

# Ganzheitliche Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von:           Ing. Lisandro Mariano Quiroga  
aus:           Buenos Aires

eingereicht am:	2. September 2011
mündliche Prüfung am:	16. Dezember 2011
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. E. Schnieder apl. Prof. Dr.-Ing. C. Herrmann Dr.-Ing. M. Antoni
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Lemmer

2012



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in den Jahren 2009 bis 2011 als Stipendiat des Deutschen Akademischen Austausch Dienstes (DAAD) am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Beim Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. E. Schnieder, möchte ich mich an dieser Stelle für die stetig erbrachte umfassende Betreuung, für die Unterstützung meiner Bewerbung beim DAAD und nicht zuletzt weil er an mein Leistungspotenzial als Nachwuchswissenschaftler geglaubt hat, bedanken.

Außerdem Herrn Dr.-Ing. Marc Antoni, Leiter des *Pôle Ingénierie Innovation Technologique* des SNCF, danke ich für die Vermittlung aller für die Realisierung dieser Arbeit benötigten Informationen, die Einführung in die aktuelle Problematik der Instandhaltungsprozesse der Eisenbahninfrastrukturen sowie für die Übernahme eines Koreferats.

Mein Dank gilt auch Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. C. Herrmann, Leiter der Abteilung Produkt- und Life-Cycle-Management des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme eines Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Lemmer, Leiter des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Auch an alle Institutsmitglieder, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Stefan Wegele, geht ein herzlicher Dank. Herrn Dipl.-Ing. Geltmar von Buxhoeveden danke ich für die umfangreichen Korrekturlesung der Arbeit.

Auf ganz besondere Weise danke ich meinen Eltern Liliana und Carlos, die mir das Leben gegeben haben und mir als Vorbilder gelten sowie meinem Großvater Víctor Quiroga, der mir den generationenübergreifenden Eisenbahnerstolz unlöslich vermittelt hat.

Widmen möchte ich diese Arbeit meiner Frau Marina und meinem Sohn Manuel, treibende Kräfte und endgültige Motivation aller meiner Bemühungen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemrelevanz . . . . .	2
1.2	Problemabgrenzung und -beschreibung . . . . .	3
1.3	Zielstellung . . . . .	4
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Das System Gleis: seine Alterung und Instandhaltung</b>	<b>6</b>
2.1	Alterung der Gleisgeometrie . . . . .	6
2.2	Messung der Gleisgeometrie . . . . .	9
2.3	Die Instandhaltungsmaßnahmen der Gleisgeometrie . . . . .	9
2.3.1	Stopfen . . . . .	10
2.3.2	Schleifen . . . . .	10
2.3.3	Schotterbettreinigung . . . . .	11
2.4	Alterungs- und Instandsetzungsmodelle . . . . .	11
2.4.1	Deterministische Modelle . . . . .	12
2.4.2	Stochastische Modelle . . . . .	13
2.4.3	Evolutionäres Fehlertypidentifizierungs und -klassifizierungsmodell	14
2.5	Einplanungsmethoden der Gleisinstandhaltung . . . . .	14
2.5.1	Großbritannien . . . . .	15
2.5.2	Australien . . . . .	16
2.5.3	Niederlande . . . . .	17
2.5.4	Korea . . . . .	17
2.5.5	Japan . . . . .	19
2.5.6	Portugal . . . . .	20
2.6	Kritische Würdigung der Alterungsmodelle und Aufgabenplanungs- verfahren . . . . .	21
2.6.1	Alterungsmodelle . . . . .	21
2.6.2	Einplanungsverfahren . . . . .	22
2.7	Fazit . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Modellierung und Simulation des Alterungs- und Instandsetzungs- prozesses des Gleisgeometriezustands</b>	<b>27</b>
3.1	Einleitung . . . . .	27

3.2	Prozessmodell . . . . .	29
3.2.1	Modellpostulate . . . . .	29
3.2.2	Identifikation der Modellparameter . . . . .	30
3.2.3	Monte Carlo Simulationsprozess . . . . .	34
3.3	Anpassung an variierende Einflussfaktoren . . . . .	36
3.4	Fallstudie . . . . .	37
3.4.1	Untersuchung der statistischen Unabhängigkeit von $NLinit$ und $b$ . . . . .	37
3.4.2	Untersuchung der Lognormalität von $NLinit$ und $b$ . . . . .	37
3.4.3	Systemidentifikation . . . . .	40
3.4.4	Simulierte Prozessrealisierungen . . . . .	43
3.5	Modellierung inhomogener Gleisabschnitte . . . . .	44
3.5.1	Clusteranalyse . . . . .	45
3.5.2	Clustering-Algorithmen . . . . .	46
3.5.3	Angewendete Clustering Bibliothek . . . . .	48
3.5.4	Implementierung . . . . .	49
3.6	Ausblick . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Prognostizierung des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses des Gleisgeometriezustands</b>	<b>53</b>
4.1	Einleitung . . . . .	53
4.2	Problemdefinition . . . . .	53
4.3	Angewendete Modelle . . . . .	54
4.3.1	Instandsetzungsmodell . . . . .	54
4.3.2	Alterungsmodelle . . . . .	55
4.3.3	Exponentielle Glättung . . . . .	55
4.3.4	Polynomisches Modell . . . . .	56
4.3.5	Autoregressives Modell . . . . .	57
4.3.6	Hybrides Modell . . . . .	57
4.4	Fallstudie . . . . .	60
4.5	Ausblick . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Optimale Planung der Stopfeingriffe</b>	<b>65</b>
5.1	Einleitung . . . . .	65
5.2	Eingriffsplanungsmethode . . . . .	66
5.2.1	Problemdefinition . . . . .	66
5.2.2	Gütefunktion . . . . .	69
5.2.3	Heuristik . . . . .	70
5.3	Modellerweiterung durch Zulassung der Unterteilung von Stopfeingriffen . . . . .	72
5.3.1	Erweiterte Heuristik . . . . .	73
5.4	Fallstudien . . . . .	78
5.4.1	Spezifizierung des Szenarios . . . . .	78
5.4.2	Fallstudie 1: Ermittlung eines Stopfplans für eine vorgegebene Anzahl von Einsatznächten $N$ . . . . .	80

5.4.3	Fallstudie 2: Minimierung der jährlichen Gesamtkosten der Stopf- arbeiten . . . . .	81
5.5	Ausblick . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Ganzheitliche Optimierung der Instandhaltungsstrategie</b>	<b>87</b>
6.1	Einleitung . . . . .	87
6.2	Simulationsverfahren zur ganzheitlichen Auswertung von Instandhal- tungsstrategien . . . . .	87
6.2.1	Eingangsdaten . . . . .	88
6.2.2	Simulationsablauf . . . . .	88
6.2.3	Ausgangsdaten . . . . .	89
6.2.4	Ausblick . . . . .	91
6.3	Fallstudie . . . . .	91
6.3.1	Szenario . . . . .	91
6.3.2	Betrachtete Instandhaltungsstrategien . . . . .	92
6.3.3	Relevante Merkmale der Simulationsergebnisse . . . . .	93
6.3.4	Simulationsergebnisse . . . . .	95
6.3.5	Methodischer Ansatz zur Auswertung der simulierten Instand- haltungsstrategien . . . . .	99
6.4	Ausblick . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>103</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	103
7.2	Würdigung der Ergebnisse . . . . .	104
7.3	Ausblick . . . . .	105

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung der Hochgeschwindigkeitsstreckenkilometer in der Welt [UIC, 2010] . . . . .	1
1.2	Darstellung des Instandhaltungsprozesses als prädiktiver Regelkreis mit Verweis auf die jeweiligen Kapitel . . . . .	3
2.1	Klassendiagramm der Eigenschaften, Merkmale und Größen des Begriffs Gleisqualität nach [SCHNIEDER, 2009] . . . . .	7
2.2	Merkmale der Gleisgeometrie [SAUSSINE, 2004] . . . . .	8
2.3	Stopfung auf relativer (Abb. 2.3(a)) und absoluter (Abb. 2.3(b)) Basis [MEIER-HIRMER, 2007, S. 38-39] . . . . .	11
2.4	Schematischer Gleisqualitätsverlauf nach exponentiellem Modell [LICHTBERGER, 2007] . . . . .	12
2.5	Modellierung des Gleisqualitätszustands als Markow-Kette [LYNGBY et al., 2008] . . . . .	13
2.6	Beispiel eines Gamma-Prozesses . . . . .	14
2.7	Mögliche Ansätze zur Lösung hochkomplexer Optimierungsprobleme . .	24
3.1	Verlauf des Längshöhenfehlers und durchgeführte Stopfeingriffe auf einem Hochgeschwindigkeitsstreckensektor. . . . .	28
3.2	Flussdiagramm des eingesetzten Monte Carlo Simulationsverfahren. . .	35
3.3	$NLinit$ vs $b$ . . . . .	38
3.4	Geschätzte Mittelwerte und Standardabweichungen und eingepasste Mittelwerte von $NLinit_n$ . . . . .	40
3.5	Geschätzte Mittelwerte und Standardabweichungen und eingepasste Mittelwerte von $b_n$ . . . . .	41
3.6	Geschätzte und eingepasste Standardabweichungen von $NLinit_n$ . . . .	42
3.7	Geschätzte und eingepasste Standardabweichungen von $b_n$ . . . . .	42
3.8	Deterministische Simulation mit Eingriffsschwelle 0,7 . . . . .	43
3.9	Stochastische Simulation mit Eingriffsschwellen 0,9 und 1,1 . . . . .	44
3.10	Prozessrealisierung mit Betriebsgeschwindigkeiten 250 bzw. 300 km/h .	45
3.11	Hierarchische Zuordnung der Clustering-Algorithmen [WIKIPEDIA, 2011a]	46
3.12	Beispiel eines hierarchischen Clusterings . . . . .	48
3.13	Fehler als Funktion der Anzahl der Cluster . . . . .	50
3.14	Detail der Abb. 3.13(b) . . . . .	51



4.1	Schematische Übersicht der Prognosemodellauswahl . . . . .	54
4.2	Prozedur für die Entkopplung von Verschleiß und Instandsetzung für die Prognoseerstellung durch exponentielle Glättung . . . . .	56
4.3	Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem ARMA-Modell . . . . .	61
4.4	Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem exponentiellen Glättungsmodell . . . . .	61
4.5	Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem polynomischen Modell . . . . .	62
4.6	Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem hybriden Modell . . . . .	62
4.7	Vergleich der mit dem hybriden Modell und dem exponentiellen Glättungsmodell erreichten Prognosefehler . . . . .	63
5.1	Vergleich eines zusammenhängenden ( $Sa$ ) und eines unterteilten ( $Sb$ ) Stopfeingriffs . . . . .	73
5.2	Modelliertes Schienennetz. Es besteht aus einem 120 km langen zweigleisigen Streckenabschnitt, d. h. die Gesamtstrecke beträgt 240 km. . .	79
5.3	Letzter Messwert und erwarteter Längshöhenfehler einer Gleisstrecke mit einjährigem Prädiktionshorizont . . . . .	80
5.4	Korrektive Stopfeingriffe als Funktion der präventiven Stopfeingriffe . .	85
5.5	Jährliche Gesamtkosten der Stopfung (bezogen auf die Kosten eines präventiven Stopfeingriffes) als Funktion der Anzahl der präventiven Stopfeingriffe, bezogen auf die Kosten eines korrektiven Stopfeingriffes .	85
6.1	Flussdiagramm des Simulationsablaufs . . . . .	90
6.2	Eingriffs- und Warnungsschwellen der betrachteten Instandhaltungsstrategien . . . . .	93
6.3	Für ihre Auswertung berücksichtigte Eigenschaften, Merkmale und Größen einer Instandhaltungsstrategie (basierend auf [SCHNIEDER, 2009]) .	94
6.4	Anzahl der jeder jährlichen Stopfkampagne zugewiesenen Stopfeinsätze	96
6.5	Mittelwert und Streuung des Längshöhenfehlers der 1200 Gleissektoren für die simulierte Dauer von 25 Jahren . . . . .	96
6.6	0,10- und 0,90-Quantile der Sektoren-NL mit konstanter und konformer Eingriffsschwelle . . . . .	97
6.7	Anzahl der Gleissektoren deren $NL$ während der 25 Jahre der Simulation größer als jeweils 0,7, 0,8, 0,9 und 1,0 ist . . . . .	98
6.8	Vereinfachte Darstellung der paarweisen Vergleiche. Quelle: [DILL, 2000]	100

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zulässige Abnahmetoleranzen gleisgeometrischer Merkmale nach Instandhaltung [DIN EN 13231-1, 2011] . . . . .	8
2.2	Instandhaltungsmaßnahmen und ihre Durcharbeitungszyklen [LICHTBERGER, 2007] . . . . .	10
2.3	Lebensdauer der Gleiskomponenten [LICHTBERGER, 2007] . . . . .	10
2.4	Globale Gleisinstandhaltungskostenfaktoren pro Gleis-km bei verschiedenen Schleifperioden. X: Bezugskostenfaktor [ANTONI et al., 2009] . .	11
2.5	Übersicht der dargestellten Alterungsmodelle der Gleisgeometrie . . . .	22
2.6	Übersicht der dargestellten Verfahren zur Planung von Gleisinstandhaltungsmaßnahmen . . . . .	25
3.1	Ergebnisse der KS-Anpassungstests für $NLinit_n$ . . . . .	39
3.2	Ergebnisse der KS-Anpassungstests für $b_n$ . . . . .	40
4.1	Übersicht der Prognoseergebnisse von 200 1-Km-Langen Sektoren . . .	64
5.1	Berechnete Eingriffsplanung für das gesamte Schienennetz ohne Eingriffsunterteilungen . . . . .	82
5.2	Berechnete Eingriffsplanung für das gesamte Schienennetz mit Eingriffsunterteilungen (erweiterte Heuristik) . . . . .	82
6.1	Für die Auswertung der Instandhaltungsstrategien relevante Merkmale der Simulationsergebnisse . . . . .	98
6.2	Paarweiser Vergleich zur Ermittlung der relativen Bedeutung der in Betracht gezogenen Merkmale der Instandhaltungsstrategien . . . . .	100
6.3	Paarweiser Vergleich zur Gesamtbewertung der zwei Instandhaltungsstrategien . . . . .	101

# Kurzfassung

Die Instandhaltung der Gleisgeometrie ist für die Eisenbahnbetriebsqualität und -sicherheit von höchster Relevanz. Sie erfordert kostspielige sowohl technische als auch menschliche Ressourcen. Die optimale Ausnutzung der dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen ist daher für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs entscheidend. Jedoch zeugen Lebensdauern von über 25 Jahren und Eingriffsplanungshorizonte von bis zu drei Jahren von der Komplexität der Bestimmung einer optimalen Instandhaltungsstrategie. In der vorliegenden Arbeit wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie vorgestellt. Seine grundlegenden Komponenten sind ein Alterungs- und Instandsetzungsmodell, ein Prognostizierungsverfahren für den Gleisqualitätsverlauf und ein heuristischer Algorithmus für die Optimierung der Planung der Stopfeingriffe. Die Zusammensetzung dieser Bausteine in der Form eines prädiktiven Regelkreises resultiert in einer Simulationsumgebung für langfristige Optimierung der Instandhaltungsstrategie.

Sowohl jede der Komponenten als auch der ganzheitliche Ansatz werden anhand von Fallstudien basierend auf realen Messdaten stammend aus einer französischen TGV Hochgeschwindigkeitsstrecke validiert. Die erreichten Ergebnisse verdeutlichen das erhebliche Potenzial computergestützter Systeme für die Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie.

# Abstract

The maintenance process of railway track geometry is highly relevant for the system operation quality and safety, demanding huge technical and human resources. An optimal deployment of the available resources is therefore crucial for the cost-effectiveness of railway operation. However lifetimes of more than 25 years and maintenance planning horizons of up to three years evidence the high complexity of the assessment of the optimal maintenance strategy.

In this work a holistic approach to the optimisation of the maintenance process of the track geometry is presented. Its main constituents are an ageing and restoration process model, a forecasting method, and a heuristic algorithm for planning and scheduling optimisation of tamping interventions. The combination of these milestones results in a simulation environment for long term optimisation of the maintenance strategy.

Each of the constituents as well as the holistic approach are validated by means of case studies basing on real data collected on a French TGV high speed line. The results achieved illustrate the significant potential of computational techniques for the optimisation of the railway track geometry maintenance process.

# Kapitel 1

## Einleitung

Hohe städtische Bevölkerungsdichten, steigende Ölpreise und der Bedarf an kürzeren Fahrzeiten zählen zu den wichtigsten Gründen für den stetigen Wachstum der weltweiten Hochgeschwindigkeitsnetze der Eisenbahn in den letzten Jahrzehnte. Auch für die nächsten 15 Jahre wird ein exponentielles Wachstum prognostiziert (vgl. Abb. 1.1).

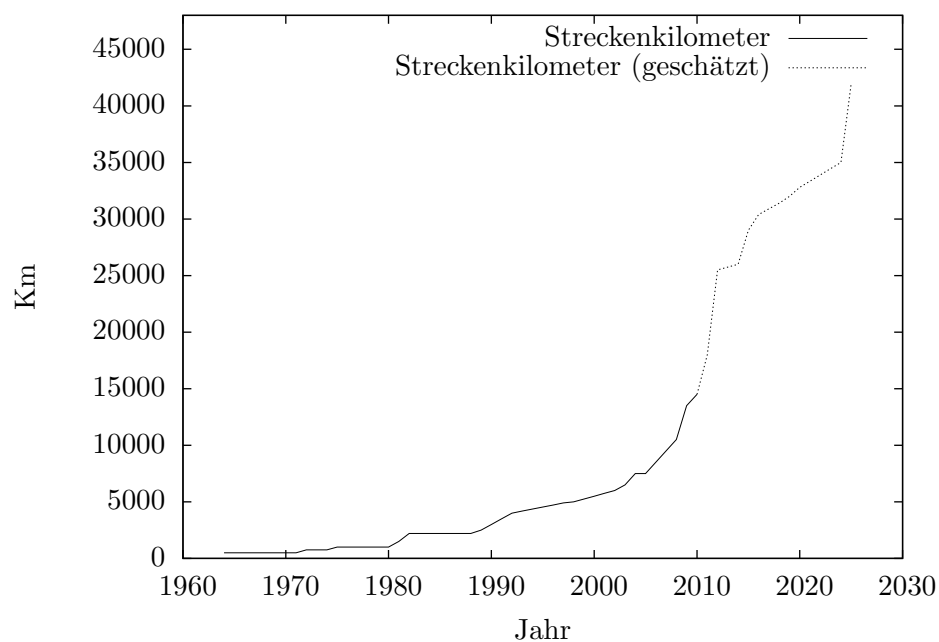


Abbildung 1.1: Entwicklung der Hochgeschwindigkeitsstreckenkilometer in der Welt [UIC, 2010]

Die Instandhaltung des Systems Hochgeschwindigkeitsgleis ist eine Aufgabe, die sowohl personell als auch technologisch kostspielige Ressourcen einfordert. Ihr Ziel ist die Gewährleistung der Systemfunktionalität unter Minimierung der Lebenszykluskosten.

Sie erwirbt große Relevanz aufgrund der aktuellen Situation der europäischen Eisenbahnbetreiber. Die treibende Kraft ist die Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Verkehrsträgern, jedoch ohne in den historischen Kerneigenschaften Sicherheit, Zuverlässigkeit und Fahrkomfort nachzugeben. Eine solche Verbesserung stellt sowohl höhere Geschwindigkeiten und Taktfrequenzen und damit eine gesteigerte Beanspruchung auf das Gleis dar, als auch die Erhaltung wettbewerbfähiger Preise.

Die vorliegende Arbeit beruht auf der Überzeugung, dass einer solchen Anforderung nur anhand der stetigen Optimierung der Nutzung der verfügbaren Ressourcen nachzukommen ist, wobei der Einsatz moderner computergestützter Systeme unabdingbar ist.

## 1.1 Problemrelevanz

Die Relevanz der Instandhaltung des Systems Gleis drückt sich anhand von zwei Aspekten aus:

1. Die Notwendigkeit für den korrekten Eisenbahnbetrieb.

Die Aufgaben des Gleises sind wie folgt [LICHTBERGER, 2007]:

- die Fahrzeuge entgleisungssicher führen,
- die vertikalen und horizontalen Fahrzeugkräfte aufnehmen,
- diese Kräfte über Gleisrost und Schotterbett in den Untergrund ableiten,
- einen guten Fahrkomfort sicherstellen und
- eine hohe Verfügbarkeit für den Betrieb gewährleisten

Daher ist ein sicherer, zuverlässiger und komfortabler Eisenbahnbetrieb ohne ein funktionsfähiges Gleis ausgeschlossen.

2. Die hohen Kosten.

Basierend auf Daten aus Belgien, Frankreich, Italien, den Niederlanden und Spanien, betragen die jährlichen Instandhaltungskosten einer Hochgeschwindigkeitslinie ca. €30.000 pro Streckenkilometer [DE RUS, 2008]. Beispiel dafür ist das jährliche Budget in 2001 von ProRail (zuständig für die Eisenbahninfrastruktur in den Niederlanden) für die Instandhaltung und Renovierung seines Netzes von über €50.000 pro Streckenkilometer [JOVANOVIC, 2004]. Daraus lässt sich folgern, dass sogar marginale Verbesserungen der Effizienz der Instandhaltung signifikante Einsparungen mit sich bringen würden.

## 1.2 Problemabgrenzung und -beschreibung

Abb. 1.2 zeigt den Instandhaltungsprozess des Systems Gleis als prädiktiver Regelkreis in welchem die räumliche und zeitliche Aufgabenplanung auf Basis von Gleiszustandsprognosen erfolgt. Weiterhin wird dargestellt, in welchem Kapitel der vorliegenden Arbeit jeder Prozessbaustein behandelt wird.

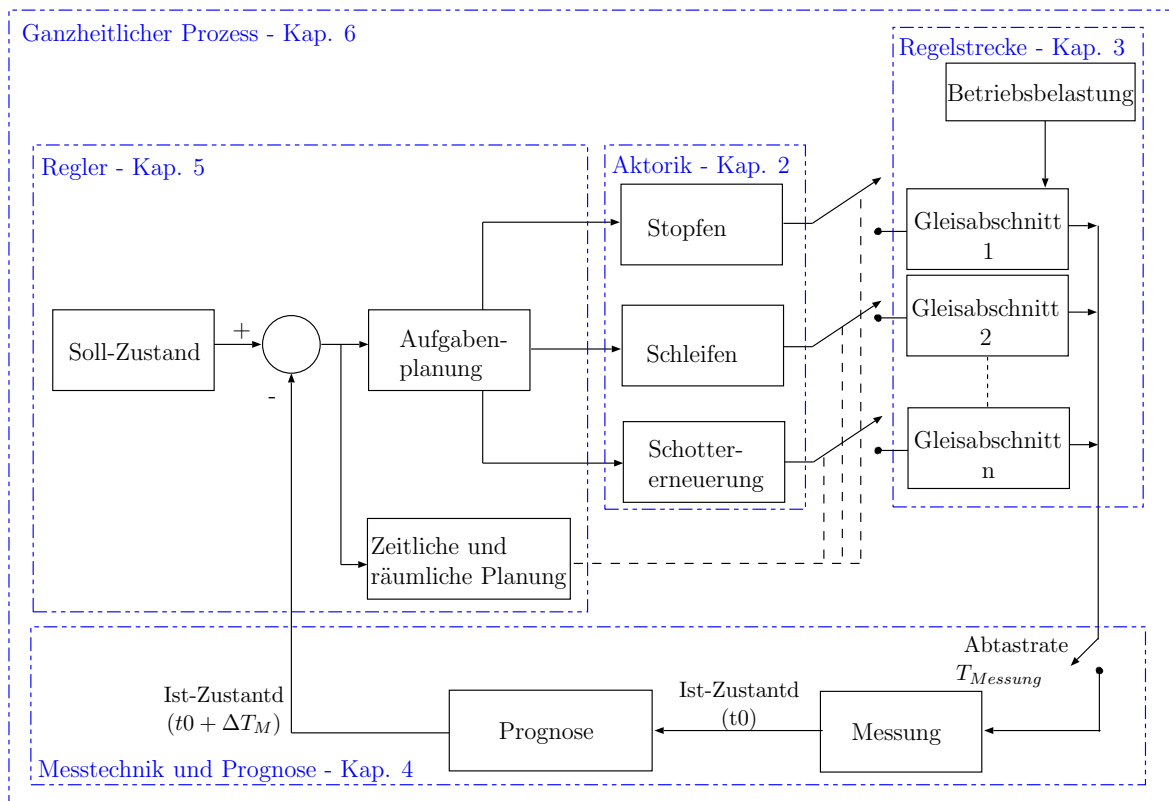


Abbildung 1.2: Darstellung des Instandhaltungsprozesses als prädiktiver Regelkreis mit Verweis auf die jeweiligen Kapitel

Das von diesem Prozess umfasste Zeitintervall ist für jede einzelne Maßnahme gemäß des Gleisanspruches (erlaubte Fahrgeschwindigkeit, Achsgewicht, etc.) unterschiedlich. Als Referenzwert gilt im Falle des Stopfens von Hochgeschwindigkeitsstrecken eine Häufigkeit von einem bis zwei Eingriffen pro Jahr. Gemäß der für die Strecke vom Betreiber bestimmten Sicherheits- und Fahrkomfortniveaus sowie der Fahrgeschwindigkeit werden die zulässigen Gleisgeometrieabweichungen ermittelt (Soll-Zustand). Der Ist-Zustand wird anhand von dedizierten Messwagen (vgl. Abschnitt 2.2) ermittelt und mit Hilfe eines Alterungsmodells wird eine Prognose für den Verlauf des Gleiszustandes während der zu planenden Periode erstellt. So wird geschätzt, welche Streckenabschnitte im Laufe der zu planenden Periode die zulässigen Abweichungen überschreiten werden und somit Instandhaltungsmaßnahmen bedürfen. Der nächste Schritt ist die

Planung der durchzuführenden Maßnahmen. Hierzu müssen zwei mögliche Szenarios betrachtet werden:

1. Die Ressourcen genügen für die Ausführung aller erforderlichen Maßnahmen. In diesem Fall ist das Ziel der Einplanung, die verfügbaren Ressourcen optimal auszunutzen. Dafür muss aber vorerst ein Optimalitätskriterium definiert werden.
2. Die Ressourcen genügen nicht für die Ausführung aller erforderlichen Maßnahmen. In diesem Fall ist das Ziel der Einplanung die bestmögliche Lösung (d. h. die bestmögliche Stopfeingriffsplanung) zu finden. Um die Güte einer gegebenen Stopfeingriffsplanung zu ermitteln muss aber vorerst eine Gütefunktion definiert werden, vgl. Abschnitt 5.2.2.

Zuletzt werden die geplanten Maßnahmen durchgeführt, die allerdings diversen Störungsquellen unterworfen sind (insbesondere die ungeplante Unverfügbarkeit von technischen Einrichtungen bzw. Personal oder Verzögerungen bei der Durchführung der Maßnahmen). Das Auftreten solcher Störungen führt zur Umplanung.

Im Laufe dieser Arbeit wird auf die einzelnen Bausteine des oben beschriebenen Prozesses, mit Schwerpunkt auf der Instandhaltung der Gleisgeometrie, eingegangen.

### 1.3 Zielstellung

Die vorliegende Arbeit besitzt sowohl Teilziele als auch ein globales Ziel zu dessen Erfüllung alle Teilziele beitragen. Die Teilziele sind mit den einzelnen Bausteinen von Abb. 1.2 assoziiert, während das globale Ziel den gesamten dargestellten Prozess betrifft.

Die Teilziele sind die Entwicklung und Validierung

1. eines Alterungs- und Instandsetzungsprozessmodells der Gleisgeometrie, das die Simulation des Prozesses während des ganzen Nutzungsdauers ermöglicht und dessen vollständige Parametrierung anhand von Messreihen erfolgen kann.
2. eines Verfahren zur Prognostizierung des Alterungs- und Instandsetzungsprozessmodells der Gleisgeometrie, das die Einschätzung des Instandhaltungsbedarf mit Prädiktionshorizonten von über einem Jahr ermöglicht.
3. eines Algorithmus zur optimierten Einplanung von Instandhaltungsmaßnahmen am Beispiel von Stopfarbeiten. Der Algorithmus muss sich in verschiedenen Szenarien als einsetzbar erweisen und in möglichst kurzen Rechenzeiten einen detaillierten Aufgabenplan ermitteln können.

Das globale Ziel ist damit die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur ganzheitlichen Optimierung der Instandhaltungsstrategie der Gleisgeometrie mit Fokus auf Stopfeingriffen, basierend auf den o. g. Teilzielen.

Validiert werden alle entwickelten Modelle und Verfahren anhand von Fallstudien, mit auf der Grundlage realer Daten einer französischen Hochgeschwindigkeitsstrecke.



## 1.4 Aufbau der Arbeit

In Abb. 1.2 ist der Aufbau dieser Arbeit dargestellt. Jeder Block verweist auf das Kapitel, in dem er behandelt wird. Es wird deutlich, dass sich Kapitel 2 bis 5 mit den einzelnen Bausteinen des Prozesses auseinandersetzen, während das abschließende Kapitel 6 sich mit dem ganzheitlichen Prozess befasst.

Kapitel 2 setzt sich mit den Grundlagen der Alterung und Instandhaltung des Systems Gleis auseinander und gibt einen Ausblick auf den Stand der Forschung bezüglich der Prozessmodelle und Ansätze für die optimale Einplanung von Gleisinstandhaltungsarbeiten.

Im Kapitel 3 wird eine Modellierungsmethode für die Alterung und die Instandsetzung der Gleisgeometrie wie auch die Modellinstanziierung durch Systemidentifikation und Klassifikation der Streckenabschnitten anhand einer Clusteranalyse vorgestellt. Die Methode wird anhand einer Datenbank mit realen Messwerten aus einer französischen Hochgeschwindigkeitsstrecke validiert.

Kapitel 4 präsentiert ein Verfahren zur Prognostizierung des Verlaufs des Gleisgeometriefehlers auf der Basis eines hybriden Prozessmodells. Die daraus resultierenden Prognosen werden als Eingangsdaten für die Aufgabenplanung benutzt. Durch eine Fallstudie mit realen Messreihen wird das Verfahren mit herkömmlichen Prognosealgorithmen verglichen.

Kapitel 5 behandelt eine Methode für die optimale Planung der Instandhaltungsmaßnahmen, welche im in Abb. 1.2 dargestellten Regelkreis die Rolle des Reglers spielt. Die Methode wird in einem auf realen Daten basierenden Szenario validiert.

Im darauf folgenden Kapitel 6 werden die in den Kapiteln 3 bis 5 entwickelten Bausteine als Komponenten einer ganzheitlichen Simulationsumgebung des in Abb. 1.2 vorgestellten Prozesses eingesetzt. Verschiedene Instandhaltungsstrategien werden für ein hypothetisches Streckennetz analysiert und verglichen.

## Kapitel 2

# Das System Gleis: seine Alterung und Instandhaltung

Die Fahrsicherheit und der Fahrkomfort sind Eigenschaften des Systems Eisenbahn, die von der Qualität des Gleises abhängen. Relevante Merkmale der Gleisqualität sind Gleisaufbau, -trassierung und die von dieser Arbeit betroffene Gleisgeometrie. Diese wird von der Gleisbeanspruchung negativ und von den Instandhaltungsmaßnahmen positiv beeinflusst. In Abb. 2.1 wird dieser Zusammenhang in Form eines Klassendiagramms dargestellt.

Im Folgenden werden die relevanten Merkmale der Gleisgeometrie und ihr Alterungs- und Instandhaltungsprozess vorgestellt. Zudem werden ausgewählte in der Literatur vorhandene Prozessmodelle sowie Aufgabenplanungsverfahren rezensiert.

### 2.1 Alterung der Gleisgeometrie

Auf die wirkenden Berühr- und Führungskräfte sowie auf die Schlupfwirkung der darauf fahrenden Züge reagiert das Gleis mit Verwindungs- und Längshöhenfehlern an der Schienenfahrfläche, benannt als Gleisgeometriefehler oder auch Gleislage [LICHTBERGER, 2007].

Als relevanteste gleisgeometrische Merkmale werden in [DIN EN 13848-5, 2010] die folgenden aufgelistet:

- Gegenseitige Höhenlage (s. Abb. 2.2(a))
- Längshöhen (s. Abb. 2.2(c))
- Verwindung (s. Abb. 2.2(d))
- Richtung (s. Abb. 2.2(b))
- und Spurweite

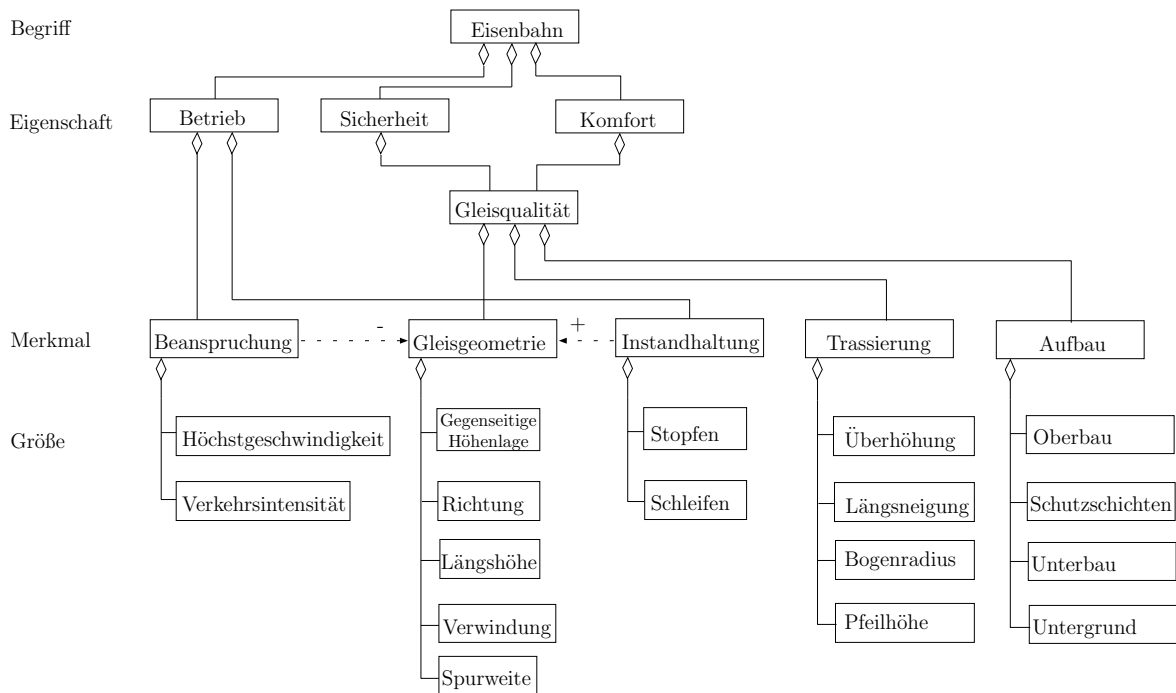


Abbildung 2.1: Klassendiagramm der Eigenschaften, Merkmale und Größen des Begriffs Gleisqualität nach [SCHNIEDER, 2009]

In Tabelle 2.1 befinden sich die nach [DIN EN 13231-1, 2011] in der Europäischen Union gültigen Abnahmetoleranzen der gleisgeometrischen Merkmale nach Durcharbeitung, d. h. nach Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme. Dort lässt sich feststellen, dass höhere Fahrgeschwindigkeiten kleinere gleisgeometrische Fehler erfordern.

Der Fehlertyp und die Alterungsgeschwindigkeit können von Gleisstrecke zu Gleisstrecke unterschiedlich sein, da die Variablen, die diese bestimmen, entlang des Gleises variieren. Diese Variablen sind u. a. folgende:

- die Gleisbeanspruchung hinsichtlich der Verkehrsintensität und der Höchstgeschwindigkeit
- das Gleisalter, d. h. die Zeit seit der letzten Gleiserneuerung
- Typ und Qualität des Bahnplanums und des Untergrunds
- das Klima, insbesondere Temperatur und Niederschlagsintensität
- das Schienenprofil, z.B. UIC 60
- Trassierung (Radius).

In Abschnitt 2.4 werden verschiedene Alterungsmodelle analysiert. Dort lässt sich feststellen, dass verschiedene Modelle auch unterschiedliche Variablen berücksichtigen.

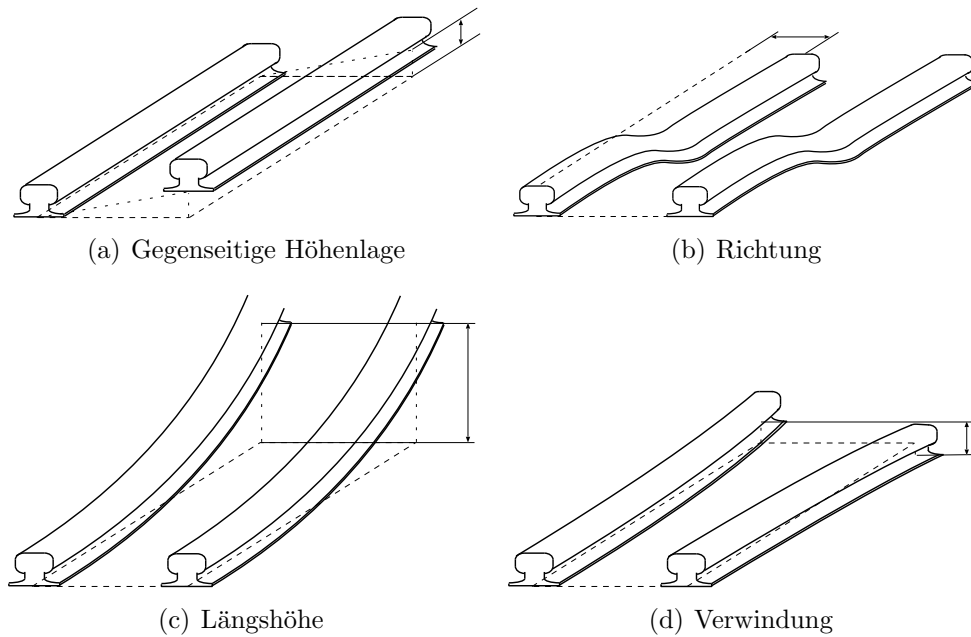


Abbildung 2.2: Merkmale der Gleisgeometrie [SAUSSINE, 2004]

Tabelle 2.1: Zulässige Abnahmetoleranzen gleisgeometrischer Merkmale nach Instandhaltung [DIN EN 13231-1, 2011]

Verkehrsart	I	II	III	IV	V
Geschwindigkeitsbereich (km/h)	$V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 220$	$V > 220$
Spurweite (mm) (Soll-/gemessenes Maß)	+7 -3	+5 -3	+4 -3	$\pm 3$	$\pm 2$
Gegenseitige Höhenlage (mm) (Soll-/gemessenes Maß)	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$
Längshöhe (mm) (Mitte zu Spitze) Messbasis 10 m	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 4$
Längshöhe (mm) (Spitze zu Spitze) Messbasis 10 m	6	5	5	4	4
Richtung (mm) (Mitte zu Spitze) Messbasis 10 m	$\pm 7$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 4$
Richtung (mm) (Spitze zu Spitze) Messbasis 10 m	6	5	5	4	4
Verwindung (mm/m) (Nulllinie zu Spitze, berechnet auf der Basis von 3 m)	$\pm 2$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1$	$\pm 1$

## 2.2 Messung der Gleisgeometrie

Der aktuelle Zustand der Gleisgeometrie wird mittels eines mit sehr präziser Sensorik ausgerüsteten Messwagens ermittelt. Im Falle der französischen Hochgeschwindigkeitsstrecken wird ein Messwagen Namens *Mauzin* verwendet, der die wichtigsten geometrischen Merkmale des Gleises erfassen kann [MEIER-HIRMER, 2007]. Diese sind:

- Längshöhe
- Richtung
- Gegenseitige Höhenlage
- Spurweite
- Streuung der Spurweite

Als Maß des Gleiszustandes wird entweder einer der ermittelten Werten genommen, oder es wird durch eine Formel ein repräsentativer Wert ausgerechnet. Korrelationsstudien [SENÉE, 2005] haben gezeigt, dass die Längs- und Quernivellierung sowie das Richten streng miteinander korreliert sind. Deshalb ist es sinnvoll, einen dieser Parameter als repräsentatives Maß des Zustandes der Gleisgeometrie anzunehmen.

Außerdem wird in [VEIT, 2007b] die ursprünglich zur Einsatzplanung **m**echanisierter **D**urcharbeitungs**z**üge entwickelte Qualitätsziffer MDZ eingeführt, die die Gleislagequalität als Beschleunigungsdifferenz in einem virtuellen Fahrzeug als Folge von Gleisimperfektionen beschreibt. Die Berechnung der MDZ beinhaltet sowohl die Längs- und Quernivellierung als auch das Richten. Darüber hinaus hängt der MDZ auch von der Fahrtgeschwindigkeit ab.

Gemäß des angestrebten Sicherheits- und Fahrtniveaus sowie der Fahrgeschwindigkeit werden die zulässigen Gleisgeometrieabweichungen von jedem Betreiber festgelegt.

## 2.3 Die Instandhaltungsmaßnahmen der Gleisgeometrie

Die relevantesten Maßnahmen für die Instandhaltung der Gleisgeometrie und ihre Durcharbeitungszyklen sind nach [LICHTBERGER, 2007] in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die typischen Lebensdauer der Komponenten des Gleises sind in Tabelle 2.3 aufgelistet.

Im Folgenden werden die in Tabelle 2.2 benannten Maßnahmen dargestellt.

Tabelle 2.2: Instandhaltungsmaßnahmen und ihre Durcharbeitungszyklen [LICHTBERGER, 2007]

Massnahme	Mio. Tonnenkilometer	Jahre
Stopfen	40-70	3-5
Schleifen	20-30	1-3
Reinigen	150-300	12-15

Tabelle 2.3: Lebensdauer der Gleiskomponenten [LICHTBERGER, 2007]

Komponente	Mio. Tonnenkilometer	Jahre
Schienen	300-1000	10-15
Holzschwellen	250-600	20-30
Betonschwellen	350-700	30-40
Befestigungsmittel	100-500	10-30
Schotter	200-500	20-30
Sanierter Untergrund	> 500	> 40

### 2.3.1 Stopfen

Durch das Stopfen wird das Gleis mittels Vibration und Verdichtung der Schotterkörner unter den Schwellen wieder in die geometrisch korrekte Lage gebracht [LICHTBERGER, 2010, S. 459]. Wie in Abb. 2.3 dargestellt, wird diese Maßnahme von Stopfmaschinen durchgeführt, von denen im Rahmen dieser Arbeit zwei Typen in Betracht gezogen werden:

- Relative Richtung. Das Gleis wird zur richtigen Lage mit Bezug auf die Achsen der Stopfmaschine gebracht.
- Absolute Richtung. Das Gleis wird zur absoluten optimalen Lage zurückgestellt.

### 2.3.2 Schleifen

Das Schleifen hat keinen direkten Einfluss auf die Gleisgeometrie, da es nur die Schienen betrifft. Dessen ungeachtet „... zeigen die Beispiele in der Literatur, dass durch Schleifen und Reprofilieren die Lebensdauer der Schienen [ausgedrückt durch die Verkehrsleistung in Tonnenkilometer] um mindestens 100 Mio. Tonnen verlängert werden kann. Außerdem scheint die Beseitigung der Schienenoberflächenfehler zu einer Erhöhung der Haltbarkeit der Längshöhengeometrie um 30-50 % zu führen ...“ [LICHTBERGER, 2010, S. 508]. In [ANTONI et al., 2009] wird die Wirtschaftlichkeit des periodischen Schleifens analysiert. Tabelle 2.4 zeigt die dort berechneten Ergebnisse für klassische

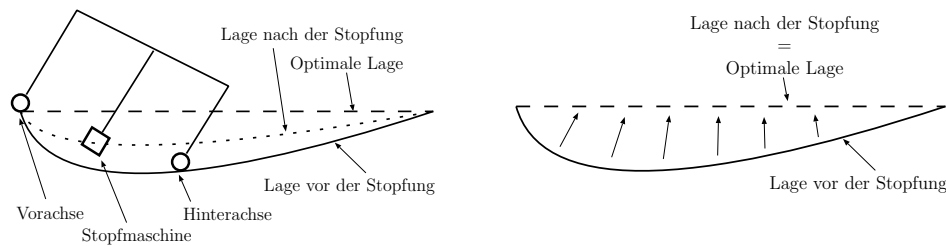


Abbildung 2.3: Stopfung auf relativer (Abb. 2.3(a)) und absoluter (Abb. 2.3(b)) Basis [MEIER-HIRMER, 2007, S. 38-39]

Eisenbahnstrecken und Hochgeschwindigkeitsstrecken, bezogen auf eine arbiträre Geldeinheit X.

Tabelle 2.4: Globale Gleisinstandhaltungskostenfaktoren pro Gleis-km bei verschiedenen Schleifperioden. X: Bezugskostenfaktor [ANTONI et al., 2009]

Streckentyp	Ohne Schleifen	Alle 5 Jahre	Jedes Jahr
Hochgeschw.	9,6 X	8,5 X	7,0 X
Klassisch	6,7 X	6,1 X	5,8 X

### 2.3.3 Schotterbettreinigung

Unabdingbar für die Erhaltung des Gleisqualität ist der ungehinderte Abfluss des Oberflächenwassers. Dafür ist eine ausreichende Räumbreite erforderlich, welche durch Schotterbettreinigung erreicht wird [LICHTBERGER, 2007].

## 2.4 Alterungs- und Instandsetzungsmodelle

Um den Gleisqualitätsverlauf erfolgreich zu prognostizieren, sind geeignete Alterungs- und Instandsetzungsmodelle erforderlich. In der Fachliteratur sind mehrere solche Modelle zu finden. Für den Aufbau dieser Modelle sind zwei mögliche Datenquellen von Bedeutung:

- Laborversuche, in denen Formeln abgeleitet werden, die den Qualitätsverlauf als Funktion verschiedener Parameter (typischerweise Achsengewicht, Geschwindigkeit und Gesamtverkehr) beschreiben.
- Messdaten. Die Verfügbarkeit von historischen Messdaten der Gleisgeometrie ermöglicht die Identifizierung von Formeln, die den Qualitätsverlauf als Funktion beispielsweise der Zeit beschreiben.

In [UBALDE et al., 2005] werden 14 Veröffentlichungen mit verschiedenen Alterungsmodellen der Gleisgeometrie aufgelistet. Dabei werden den Einflussparametern sehr unterschiedlichen Gewichten zugeordnet. Das zeugt davon, dass eine universelle Charakterisierung der Einflüsse dieser Parameter auf den Gleisqualitätsverlauf bislang nicht praktikabel ist. Die vorhandenen Modelle lassen sich in die folgenden drei Typen aufteilen:

- Deterministisch
- Stochastisch
- Evolutionäre Fehlertypidentifizierung und -klassifizierung

Nachstehend werden einige relevanten Modelle dargestellt.

### 2.4.1 Deterministische Modelle

Bei deterministischen Modellen wird für die Alterungsformel eine in der Regel polynomische [JOVANOVIĆ, 2004] oder exponentielle [VEIT, 2007b] feste Struktur angenommen. Anhand von Systemidentifikationsmethoden (typischerweise kleinste Quadrate) wird die den Messdaten am nächsten liegende Parametrierung gesucht. Abb. 2.4 zeigt den mit einem exponentiellen Modell berechneten schematischen Gleisqualitätsverlauf.

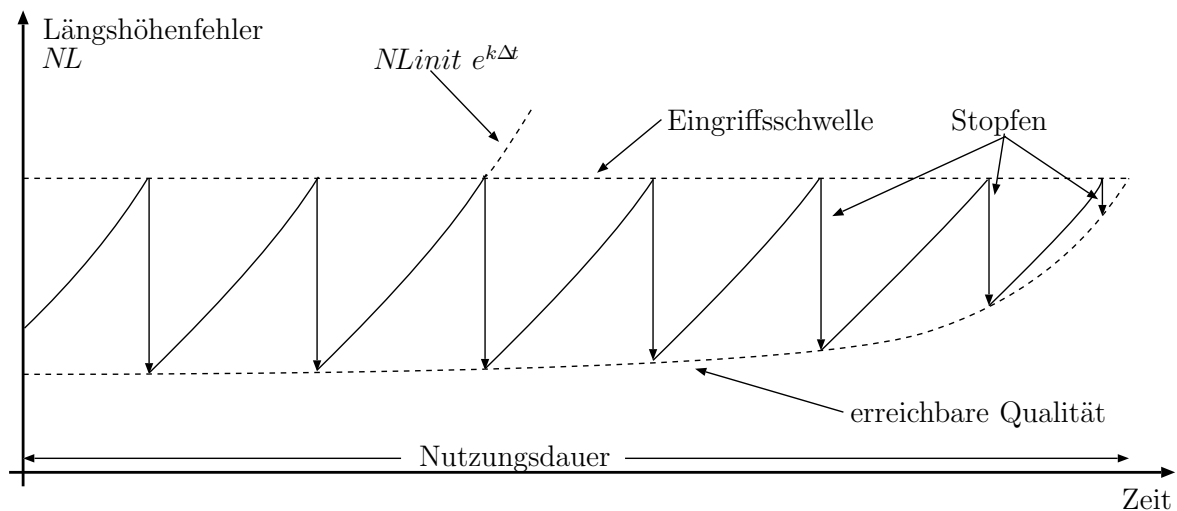


Abbildung 2.4: Schematischer Gleisqualitätsverlauf nach exponentiellem Modell [LICHTBERGER, 2007]



### 2.4.2 Stochastische Modelle

Die im Laufe der Jahre beobachteten Unregelmäßigkeiten des Gleisqualitätsverlaufs haben dazu geführt, diesen als stochastischen Prozess zu modellieren. So haben [LYNGBY et al., 2008] einen Gleisqualitätsindikator mittels der Zustände einer Markow-Kette [MARKOW, 1971] modelliert. Ohne Instandhaltung kann der Qualitätsindikator sowohl wachsen als auch sinken, allerdings ist die Alterungsgeschwindigkeit immer positiv (d. h. nach Abb. 2.5 ist  $\lambda_n > \mu_n$ ). Die Werte der Transitionsraten  $\lambda_n$  und  $\mu_n$  werden basierend auf den Messdaten berechnet. Es gibt drei Zustandsbereiche: für  $Z_1 \dots Z_a$  mit  $a > 1$  ist die Gleisqualität gut, für  $Z_{a+1} \dots Z_b$  mit  $b > a$  ist sie im Warnbereich, und für  $Z_x$  mit  $x > b$  ist eine Instandhaltungsmaßnahme erforderlich. Darüber hinaus wird der Einfluss des Kurvenradius auf den Qualitätsverlauf durch drei verschiedene Parametrierungen dargestellt: eine erste für gerade Strecken, eine zweite für Transitionskurven (d. h. mit großem Radius), und eine dritte für normale Kurven (d. h. mit kleinem Radius).

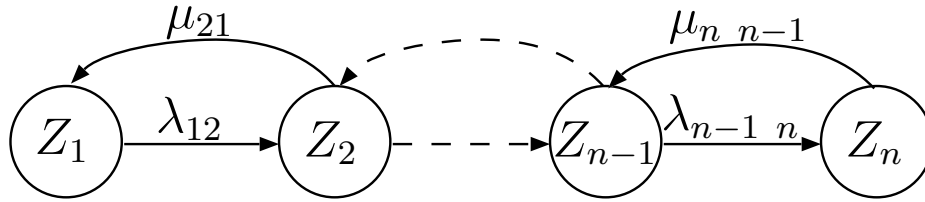


Abbildung 2.5: Modellierung des Gleisqualitätszustands als Markow-Kette [LYNGBY et al., 2008]

Ein anderes bemerkenswertes Modell befindet sich in [MEIER-HIRMER et al., 2006]. Es benutzt für die Modellierung des Alterungsprozesses einen Gamma-Prozess [SATO, 1999]. Der Gamma-Prozess ist ein Lévy Prozess mit stationären, unabhängigen Gamma-verteilten Zuwächsen. Demnach kann der Gleisqualitätsindex im Laufe der Zeit unter diesem Modell nur wachsen (je größer der Index, desto geringer die Qualität). In Abb. 2.6 befindet sich ein Beispiel einer Realisierung eines Gamma-Prozesses. Der Prozess wird von zwei Parametern bestimmt:  $\alpha$  und  $\beta$ . Für jeden 200 Meter langen Streckenabschnitt werden diese zwei Parameter mittels eines CART-Baums [BREIMAN et al., 1984] identifiziert. Dieser Baum beinhaltet ca. 15 Variablen, die den Gleisqualitätsverlauf potentiell beeinflussen können. Dazu zählen, neben typischerweise berücksichtigten Größen (Tonnage, Geschwindigkeit und Gleisalter), auch Merkmale der Gleiskomponenten (Gleisbett, Schienen, Schwellen) und der Trassierung (Kurven, Brücken, Tunnels) sowie die gesamte Anzahl von bereits durchgeführten Stopfungen und klimatischer Merkmale. In diesem Modell gibt es keine diskreten Zustände, jedoch werden 4 Bereiche des Gleisqualitätsindex definiert: Intakt-, Warn-, Eingriffs- und Geschwindigkeitsreduktionsbereich.

Von ihrer Funktionalität her sind beide Modelle sehr ähnlich, davon abgesehen, dass der Gamma-Prozess stets zunimmt während der Markow-Prozess auch noch absinken

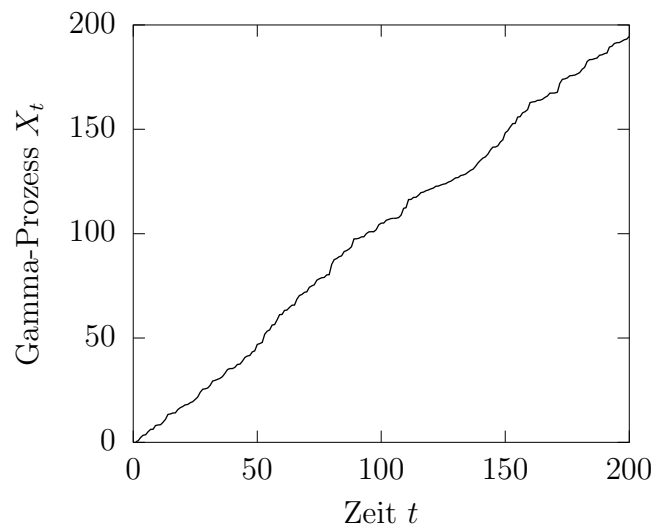


Abbildung 2.6: Beispiel eines Gamma-Prozesses

kann. Dennoch wird in [MEIER-HIRMER et al., 2006] eine weitgehend vollständigere Datenbank als in [LYNGBY et al., 2008] angewendet. Dieses wird vom CART basierten Verfahren ermöglicht, wodurch die Anzahl der Variablen theoretisch unbeschränkt wird, und damit alle verfügbare Informationen mitberücksichtigt werden können.

### 2.4.3 Evolutionäres Fehlertypidentifizierungs und -klassifizierungsmodell

Dieses Modell ist in [BARTRAM et al., 2008] entwickelt worden. Anhand von genetischen Algorithmen wird versucht die verschiedenen Strukturen (z. B. ein Polynom zweiten Grades), die der Qualitätsverlauf übernehmen kann, zu gruppieren und als Fehlertypen zu klassifizieren. Danach wird jedem Fehlertyp die am besten geeignete Instandhaltungsmaßnahme zugeordnet. So wird je detektiertem Fehlertyp die adäquateste Maßnahme eingeplant. Dieses Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es den Begriff Fehlertyp einführt. Somit wird nicht ein einziges Alterungsmodell erzeugt, sondern es wird für jeden identifizierten Fehlertyp ein eigenes Alterungsmodell erzeugt.

## 2.5 Einplanungsmethoden der Gleisinstandhaltung

Traditionell wird die Einplanung der Gleisinstandhaltung von Fachexperten basierend auf den Messungen der Gleisgeometrie, den für das Gleis zulässigen Abweichungen und den während des einzuplanenden Zeitraums zur Verfügung stehenden Ressourcen durchgeführt. Algorithmen künstlicher Intelligenz wurden bereits in anderen Bereichen der Eisenbahnleittechnik wie Disposition (s. [LAMBROPOULOS, 2002], [WEGELE, 2005])

und Fahrplanoptimierung (s. [BLUM und ESKANDARIAN, 2002]) eingesetzt. Die große finanzielle Bedeutung, die diese Maßnahmen für die Eisenbahnbetreiber haben, hat dazu geführt, auch für die Gleisinstandhaltung auf künstlicher Intelligenz basierende Einplanungsverfahren zu entwickeln. Durch diese Methoden wird eine optimale Allokation der verfügbaren Ressourcen angestrebt, unter der Voraussetzung, die Gleisqualität stets innerhalb des vom Betreiber bestimmten zulässigen Niveaus zu halten. Wie bereits in Abb. 1.2 dargestellt, ist die Einplanung der Instandhaltung Bestandteil des Instandhaltungsprozesses und soll deshalb harmonisch mit den restlichen Teilen des Modells zum grundlegenden Ziel der Minimierung der Lebenszykluskosten beitragen. Die Komplexität eines Einplanungsverfahrens ist grundsätzlich vom Detaillierungs- und Präzisionsniveau abhängig, welches wiederum mit der Komplexität verschiedener Faktoren verknüpft ist, nämlich:

1. Größe und Topologie des instandzuhaltenden Streckennetzes
2. Potenzielle Konflikte zwischen Instandhaltungsmaßnahmen und auf dem Streckennetz geplanten Fahrten
3. Gleisalterungsmodell
4. Betriebs- und Instandhaltungskostenmodell
5. Zu minimierende bzw. maximierende Zielfunktion, Gütefunktional
6. Algorithmen zur Suche der optimalen Lösung
7. Berücksichtigung der Fahrtzeiten der Wartungsroten
8. Stochastische Modellierung der Dauer der Durchführung der Maßnahmen und Fahrten
9. Berücksichtigung der Auf- und Abrüstungszeiten vor bzw. nach den Maßnahmen

Nachfolgend werden die in diesem Bereich relevantesten bezüglich regionaler Anwendungsbereiche Veröffentlichungen zusammengefasst und bewertet.

### 2.5.1 Großbritannien

Vom *British Rail Research* entwickelt, ist [GRIMES, 1995] eine Pionierarbeit im Bereich Optimierung der Einplanung der Gleisinstandhaltung. Als Optimierungsansatz werden genetische Algorithmen angewendet. Dieses Verfahren fokussiert auf die Einplanung der Stopfung. In Großbritannien sind für den Eisenbahnbetrieb und für die Instandhaltung der Eisenbahninfrastruktur zwei separate Firmen zuständig. Die für die Instandhaltung zuständige Firma bekommt Leistungszuzahlungen, wenn der Gleiszustand sehr gut ist bzw. muss Geldstrafen zahlen wenn dieser nicht innerhalb der vereinbarten Qualität

instand gehalten wird. Folglich wird versucht, das Funktional  $F$  von Gl. 2.1 mittels genetischen Algorithmen zu maximieren.

$$F = \text{Zuzahlungen} - \text{Strafen} - \text{Kosten}. \quad (2.1)$$

Dieses Verfahren soll einen erheblichen Fortschritt gegenüber den bislang benutzten deterministischen Verfahren darstellen, da diese die Zuzahlungen und Strafen nicht mitberücksichtigt haben sondern lediglich die Stopfung aller zu sehr verschlechterten Streckenabschnitte empfohlen hat. Für jeden gestopften Gleiskilometer wird ein Fixkostenmodell benutzt. Als Alterungsmodell wird eine konstante Verschlechterungsrate für die ganze Strecke und den ganzen Zeitraum benutzt. Dies stellt ein Modell dar, das im Vergleich zu den in Abschnitt 2.4 vorgestellten Modellen sehr simpel ist. Das Verfahren wird anhand von zwei Fallstudien über Strecken von 16 bzw. 80 km Länge validiert. Die Leistungen verschiedener genetischen Algorithmen werden miteinander verglichen, wobei die besten Ergebnisse in beiden Fallstudien mit der *genetischen Programmierung* nach [KOZA, 1992] in Kombination mit den Strategien *elitist* (die beste Lösung jeder Generation wird unbedingt in die nächste übertragen) und *over selection* (die Güte der Lösungen wird quadriert um die besseren hervorzuheben) erreicht werden.

### 2.5.2 Australien

An der Universität von Queensland, Australien, wurden Verfahren für die Einplanung von Instandhaltungsmaßnahmen auf Güterzugstrecken entwickelt [HIGGINS et al., 1999, LAKE et al., 2000, LAKE und FERREIRA, 2002].

In dieser Studie werden verschiedene Maßnahmentypen in Betracht gezogen. Sowohl die Dauer der Durchführung jeder Maßnahme als auch die eventuellen Verspätungen der fahrplanmäßig auf dem instandzuhaltenden Streckennetz fahrenden Züge werden als stochastische Variablen modelliert. Die verfügbaren technischen Ressourcen und Arbeitskräfte werden auch modelliert: jeder Maschine und jedem Mitarbeiter werden die Aufgaben zugeordnet, die sie durchführen können. Auch die vor und nach jeder Maßnahme erforderlichen Auf- bzw. Abrüstungszeiten sind im Modell inbegriffen. Es wird von einer festgesetzten Liste der durchzuführenden Aufgaben ausgegangen, weshalb kein Alterungsmodell benutzt wird. Der Zeithorizont beträgt eine Woche, d. h. das Verfahren eignet sich zur kurzfristigen Einplanung. Das angestrebte Ziel ist eine gewichtete Summe von

1. den Konflikten zwischen den festgesetzten Instandhaltungsmaßnahmen und die auf der instandzuhaltenden Strecke stattfindenden Zugfahrten sowie
2. verursachten Kosten

zu minimieren. Es werden dafür heuristische Algorithmen eingesetzt: *simulated annealing*, *local search*, *multiple local search* und *tabu search* [MICHALEWICZ und FOGEL, 2002]. Die besten Ergebnisse werden mit *simulated annealing*, , erreicht. Der Ausgang

des Verfahrens ist ein Kalender mit dem Instandhaltungsplan für die nächste Woche mit einstündiger Auflösung, worauf jeder durchzuführenden Aufgabe ihre Zeit, Wartungsrotte und Maschinen zugeordnet werden.

### 2.5.3 Niederlande

Am *Econometric Institute* der *Erasmus Universität Rotterdam* wurde ein Verfahren zur Einplanung verschiedener Gleisinstandhaltungsmaßnahmen entwickelt [BUDAI und DEKKER, 2004]. Sie werden in zwei Kategorien aufgeteilt: diejenigen, die mit einer festen Frequenz stattfinden (zyklische Maßnahmen) und diejenigen, die nur nach Bedarf durchgeführt werden, je nach erfasstem Gleiszustand (aperiodische Maßnahmen). Ziel ist die Minimierung der Kosten, die sich aus den für die Gleisinstandhaltung erforderlichen Streckensperrungen ergeben. Wenn also die Kosten pro Stunde gesperrter Strecke konstant sind, wird das Ziel die Minimierung der Sperrdauer. Das führt dazu, die durchzuführenden Aufgaben so viel wie möglich zu gruppieren, um sie gleichzeitig durchzuführen. Zu diesem Zweck werden kombinierbare bzw. nicht kombinierbare Maßnahmentypen spezifiziert. Die optimale Einplanung wird mit Hilfe des Softwarepakets für die Lösung lineare, quadratische und *mixed-integer* (d. h. Probleme bei denen nicht alle Variable ganzzahlig sind) Optimierungsprobleme *Cplex* gesucht. Da diese Suche sehr lange Rechenzeiten in Anspruch nehmen kann, werden die folgenden heuristische Algorithmen für die Suche suboptimaler Lösungen in kürzeren Rechenzeiten eingesetzt:

1. Min to Max (*MiMa*)
2. Max to Min (*MaMi*)
3. Combine everything in the first period (*CEFP*)

Mit diesen heuristischen Algorithmen werden die Rechenzeiten im Vergleich zur Suche der optimalen Lösung um ca. eine Größenordnung reduziert, aber die Güte der besten gefundenen Lösung ist im Falle des leistungsfähigsten Algorithmus *MiMa* zwischen 1,8 und 4,4% kleiner. Jedoch wäre es im Falle einer realen Fallstudie wahrscheinlich nicht realistisch die optimale Lösung in akzeptabler Zeit zu finden.

Wie [LAKE und FERREIRA, 2002], wird es hier von einer festgesetzten Liste der durchzuführenden Aufgaben ausgegangen, weshalb kein Änderungsmodell benutzt wird. Der Einplanungshorizont beträgt zwei Jahre, die Auflösung zwei Wochen. Das Verfahren wird anhand von zwei hypothetischen Fallstudien validiert, mit jeweils 15, 20 bzw. 25 zyklischen Maßnahmentypen. Die besten Ergebnisse werden mit dem *MiMa* Algorithmus erreicht.

### 2.5.4 Korea

Am *Korea Railroad Research Institute* ist ein Verfahren zur langfristigen Einplanung der Gleisstoppfung von Hochgeschwindigkeitslinien [OH et al., 2006] entwickelt worden. Das

angewendete Modell ist wesentlich komplexer als die bisher genannten. Im Folgenden werden seine relevantesten Merkmale aufgelistet:

- Die ganze Strecke wird in Sektoren von jeweils 200 m. aufgeteilt.
- Das Alterungsmodell besteht aus einer fixierten Verschlechterungsrate für jeden Sektor.
- Der Einplanungshorizont beträgt fünf Jahre (Langfristige Einplanung).
- Das Ressourcen- und Kostenmodell besteht aus einer Menge Wartungsroten, zwei Modellen von Stopfmaschinen und den jeweils assoziierten täglichen Benutzungskosten.
- Die Maßnahmen müssen während der Betriebssperre, d. h. in der Nacht, durchgeführt werden, weshalb die jede Nacht verfügbare Zeit begrenzt ist.
- In jeder Nacht darf die Summierung der gesamten Fahrtzeiten plus die Auf- und Abrüstungszeiten plus die Stopfzeiten die verfügbare Zeit nicht überschreiten. Daraus ergibt sich für jede Nacht ein kleines Problem des Handlungsreisenden [APPLEGATE et al., 2007].
- Nach jeder Stopfung wird die Gleisqualität in den Anfangszustand zurückgebracht (perfekte Reparatur).

Die zu minimierende Zielfunktion besteht aus zwei gewichteten Summanden:

1. Die Gesamtsumme der gestopften Gleiskilometer. Es wird angenommen dass die Stopfung eines Sektors nur dann angebracht ist, wenn sie strikt nötig ist, d. h. wenn sein Zustand nach dem für den Sektor gültigen Alterungsmodell bis zum nächsten Instandhaltungszyklus den Qualitätsstandard überschreiten wird. Grund dafür ist, dass jede Stopfung die Nutzungsdauer des Schotters reduziert, was in [ANTONI et al., 2009] bestätigt wird.
2. Die Gesamtkosten der Stopfung.

Das Verfahren wird anhand einer Fallstudie validiert. Diese besteht aus der Einplanung der Gleisinstandhaltung einer koreanischen Hochgeschwindigkeitslinie mit einer Gesamtlänge von ca. 200 km. Die Suche einer optimalen Lösung im aus diesem Modell resultierenden Suchraum ist für die Rechenleistung heutiger Desktop-Rechner zu groß. Anstatt heuristischen Algorithmen für die Suche einer suboptimalen Lösung einzusetzen, wird versucht, die Suche der optimalen Lösung anhand von der Reduzierung der Modellkomplexität zu ermöglichen. So werden einige Vereinfachungen vorgenommen, wodurch eine erhebliche Reduktion des Suchraums erreicht wird:

- Die 200 m lange Sektoren werden zu einem ein Kilometer langen Sektoren fusioniert, wodurch sich die Anzahl der Sektoren um den Faktor fünf reduziert.

- Nur ein Stopfmaschinentyp wird betrachtet.
- Nichtlineare Gleichungen werden linearisiert.

Dieses vereinfachte Modell wird unter Anwendung der Modellierungsoftware *OPL Studio 4.0* in Form eines linearen ganzzahliges Optimierungsproblem implementiert. Für die Berechnung einer optimalen Lösung mit Hilfe des Softwarepakets *Cplex* werden sechs Stunden Rechenzeit benötigt.

### 2.5.5 Japan

Das *National Graduate Research Institute for Policy Studies* hat zusammen mit dem *Railway Technical Research Institute*, beide aus Tokio, Japan, seit mehr als zehn Jahren ein Verfahren für die Einplanung der Stopfung in Hochgeschwindigkeitsstrecken entwickelt [MIWA et al., 2000, OYAMA und MIWA, 2006]. Das angewendete Modell hat eine hohe Komplexität. Es beinhaltet detailliert ausgearbeitete Alterungs- und Instandsetzungsmodelle: Das Alterungsmodell basiert auf exponentieller Glättung [MONTGOMERY et al., 1990]. Dieses Verfahren gehört der Theorie der Zeitreihenanalyse an und sein Ziel ist die kurzfristige Prognoseerstellung eines abgetasteten Signals. Es ähnelt dem gleitenden Mittelwert, aber mit einem Glättungsfaktor, sodass bei der Prognose künftiger Werte die schon gemessenen Werte ihr Gewicht exponentiell verlieren. Der prognostizierte Wert  $V_n$  wird anhand Gl. 2.2 berechnet. Dem Glättungsfaktor wird typischerweise einen Wert zwischen 0,3 und 0,6 zugeordnet.

$$V_n = V_a + \alpha(V_t - V_a) \quad (2.2)$$

- $V_n$  : Prognose für neuen Messwert
- $V_a$  : Vorherige Prognose
- $V_t$  : tatsächlicher Messwert für vorherige Periode
- $\alpha$  : Glättungsfaktor

Das Instandsetzungsmodell ist ein einfaches lineares Modell. Der Qualitätsgewinn  $\Delta Q$  ist wie in Gl. 2.3 dargestellt. Für jeden 100 m langen Streckensektor werden die Werte der Parameter  $a$  und  $b$  anhand der Datenbank der historisch gemessenen Werte identifiziert.

$$\Delta Q = aQ_0 + b \quad (2.3)$$

- $\Delta Q$  : Qualitätsinkrement durch Stopfen
- $Q_0$  : Qualität vor Stopfen
- $a, b$  : zu identifizierende Parameter

Um den Suchraum erheblich zu reduzieren, wird das Einplanungsverfahren auf zwei Teilprobleme aufgeteilt:

1. Die Aufteilung des Streckennetzes in Sektoren, die *Einheiten* benannt werden. Die Anzahl der zu generierenden Einheiten wird von Gl. 2.4 bestimmt. Das Kriterium für die Bestimmung der Länge jeder Einheit bleibt jedoch unklar.

$$NE = NN \cdot CS \quad (2.4)$$

- $NE$  : Anzahl der zu generierenden Einheiten  
 $NN$  : Anzahl der Nächte an denen die für die Stopfung erforderlichen Ressourcen zur Verfügung stehen  
 $CS$  : Stopfkapazität der zur Verfügung gestellten Ressourcen, in Einheiten pro Nacht

Das Ziel dieses Teilproblems ist die Maximierung des gesamten Qualitätsinkrements.

2. Die Einplanung der Stopfung der im ersten Teilproblem bestimmten Einheiten, unter Berücksichtigung verschiedener Bedingungen, wie z. B. maximale Entfernung zwischen Einheiten, die in aufeinander folgende Nächte gestopft werden und Stopfkapazität pro Nacht. Die Güte der Lösung des ersten Teilproblems stellt also eine obere Grenze für die realisierbare Güte dar. Durch das zweite Teilproblem wird die realisierbare Lösung gesucht, die dieser oberen Grenze am nächsten liegt.

Mit dem XPRESS-MP, ein Softwarepaket für die Lösung linearer, quadratischer und *mixed-integer* Optimierungsprobleme, wird das Verfahren für die Lösung von drei Fallstudien mit unterschiedlichen Komplexitätsniveaus angewendet. Der Planungshorizont beträgt ein Jahr und die Längen der in Betracht gezogenen Streckennetzabschnitte betragen jeweils 47, 71 und 87 km. Die Güte (d. h. das gesamte Qualitätsinkrement) des Stopfplans der als Ergebnis des zweiten Teilproblems erreicht wird, ist lediglich 0,01 bis 1,5% geringer als die obere Grenze. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass die Implementierung der berechneten Einplanung sowohl eine Verbesserung von 0,5 bis 2,1% der gesamten Gleisqualität als auch eine Reduktion von 1 bis 16% der gesamten gestopften Gleiskilometer mit sich bringen würde.

### 2.5.6 Portugal

An der Universität von Porto wurde ein Ansatz zur langfristigen Planung der Stopfeingriffe entwickelt [VALE et al., 2011]. Ausgehend von einer Häufigkeit von 90 Tagen werden jeder Stopfkampagne Eingriffe mit dem Ziel zugeordnet, dass zu jedem Zeitpunkt alle Sektoren einen annehmbaren Gleisgeometriefehler aufweisen, d. h. keiner die vorgegebenen maximalen Fehlergrenzen überschreitet. Das Ergebnis ist also, für jede Kampagne, eine Liste von Sektoren wo ein Stopfeingriff stattfinden muss, jedoch kein Plan mit der genauen Beschreibung der bei jedem Eingriff zu stopfenden Sektoren. Für die Kostenrechnung wird die Inflationsrate berücksichtigt.



Als Alterungsmodell wird eine konstante Alterungsrate eingesetzt. Dies stellt eine gravierende Beschränkung dar indem eine langfristige Optimierung erzielt wird, in deren Fall sich die Hypothese einer konstanten Alterungsrate als unangemessen erweist [VEIT, 2007b, QUIROGA und SCHNIEDER, 2010b].

## 2.6 Kritische Würdigung der Alterungsmodelle und Aufgabenplanungsverfahren

In diesem Abschnitt werden allgemeine Schlussfolgerungen über die in diesem Kapitel dargestellten Modelle und Verfahren abgeleitet.

### 2.6.1 Alterungsmodelle

Die Alterungsmodelle unterscheiden sich bedeutend voneinander. So ist die Anzahl der beinhalteten Variablen von Modell zu Modell unterschiedlich. In [UBALDE et al., 2005] wird festgestellt, dass die traditionell berücksichtigten Variablen folgende sind:

1. Zeit seit letzter Gleiserneuerung
2. Gesamte Tonnage
3. Fahrtgeschwindigkeit
4. Achsengewicht

Darüber hinaus wird in [MEIER-HIRMER et al., 2006] bewiesen, dass der Einfluss vieler anderer Variablen auf die Gleisqualität nicht vernachlässigbar ist. Diese Variablen sind u. a.:

5. Anzahl von Stopf- und Schleifeingriffen seit der letzten Gleiserneuerung
6. Merkmale der Trassierung (Kurvenradien, Gradienten)
7. Wetterbedingungen
8. Schienen-, Schotter- und Schwellentypen
9. Brücken und Tunnel

Evolutionäre Fehlertypidentifizierungs und -klassifizierungsmodelle bieten anhand der Einführung des Begriffs Fehlertyp und der Identifizierung der für jeden Fehlertyp bestgeeigneten Instandhaltungsmaßnahme eine neue Perspektive an [BARTRAM et al., 2008]. Seine Anwendbarkeit muss aber noch untersucht werden.

In Tabelle 2.5 befindet sich eine Zusammenfassung der wesentlichen Merkmale der in diesem Kapitel vorgestellten Alterungs- und Instandsetzungsmodelle der Gleisgeometrie. Zur Übersicht wurde das im Kapitel 3 der vorliegenden Arbeit eingeführte Modell hierin eingeordnet.

Tabelle 2.5: Übersicht der dargestellten Alterungsmodelle der Gleisgeometrie

Ansatz	Prozess- verhalten	Mathematisches Modell	Zustandsraum
[VEIT, 2007b]	Deterministisch	Exponentiell	Kontinuierlich
[JOVANOVIĆ, 2004]	Deterministisch	Polynomisch	Kontinuierlich
[MEIER-HIRMER et al., 2006]	Stochastisch	Gamma-Prozess	Kontinuierlich-Diskret
[LYNGBY et al., 2008]	Stochastisch	Markow-Kette	Diskret
[OYAMA und MIWA, 2006]	Deterministisch	Exp. Glättung	Kontinuierlich
[GRIMES, 1995, OH et al., 2006, VALE et al., 2011]	Deterministisch	Linear	Kontinuierlich
Vorliegende Arbeit	Stochastisch	Exponentiell	Kontinuierlich

## 2.6.2 Einplanungsverfahren

Auch Einplanungsverfahren für die Gleisinstandhaltung wurden dargestellt und analysiert. Dabei sind einige Aspekte hervorzuheben.

Alle sechs vorgestellten Verfahren haben unterschiedliche Zielfunktionen (vgl. Tabelle 2.6). Diese Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass jeder Betreiber mit seiner Instandhaltungsstrategie seine eigenen Prioritäten und Zielen verfolgt.

Die meisten der betrachteten Ansätze benutzen sehr simple, aus konstanten Alterungsraten bestehende Alterungsmodelle. Nur in [OYAMA und MIWA, 2006] wird ein auf exponentieller Glättung basierendes Alterungsmodell eingesetzt, welches die bis zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung erfassten Gleisgeometriedaten einkalkuliert.

Von den rezensierten Verfahren erweisen sich [OYAMA und MIWA, 2006, OH et al., 2006] als am vollständigsten und damit am realitätsnächsten. Dennoch werden in [OYAMA und MIWA, 2006] und [OH et al., 2006] sowie in [VALE et al., 2011] die Suchalgorithmen als *black boxes* behandelt, da keine Analyse ihrer Funktionalität bzw. keine Rechtfertigung ihrer Auswahl vorhanden ist. Im Gegensatz dazu präsentieren [GRIMES, 1995], [BUDAI und DEKKER, 2004] und [LAKE et al., 2000] gewissenhaftere Analysen der Grundlagen der eingesetzten Algorithmen und ihre Leistungen werden miteinander verglichen. Die in [OYAMA und MIWA, 2006] und [OH et al., 2006] vorgestellten

Verfahren heben sich gegenüber den restlichen hervor, nicht zuletzt weil sie auch die Fahrtzeiten der Wartungsroten betrachten, welche im Falle der Instandhaltung längerer Strecken einen relevanten Anteil der verfügbarer Arbeitszeit in Anspruch nehmen können [QUIROGA et al., 2008]. In [OH et al., 2006] wird sogar für jede Nacht ein kleines Problem des Handlungsreisenden aufgeworfen.

Als allgemeine Anmerkung gilt, dass wenn das Verfahren ein gewisses Komplexitätsniveau erreicht, der Suchraum zu groß und dadurch die für die Suche der optimalen Lösung erforderliche Rechenzeit nicht mehr annehmbar werden, obwohl die permanente Steigerung der Rechenleistung von Desktop-Computern zu kürzeren Rechenzeiten bzw. weniger Bedarf an Modellvereinfachungen führt. Wie in Abb. 2.7 dargestellt, können unter solchen Umständen drei Ansätze angegangen werden:

- (a) Reduktion des Suchraums anhand einer Vereinfachung der Modellkomplexität
- (b) Einsatz heuristischer Algorithmen für die Suche einer suboptimalen Lösung
- (c) Eine Kombination beider o. g. Ansätze

Einerseits birgt die alleinige Umsetzung von Ansatz (a) die Gefahr, eine vom Optimum sehr abweichende Lösung zu finden. Andererseits könnte Ansatz (b) zur optimalen Lösung eines vom realen zu entfernten Problems führen.

In [OH et al., 2006] wird das Problem durch Gleissektorenaggregation (d. h. Gruppierung von Gleissektoren von 200 m in „Einheiten“ von jeweils 1 km) und Linearisierung aller nicht linearen Gleichungen stark vereinfacht, wonach eine optimale Lösung für das reduzierte Problem gefunden wird. In [GRIMES, 1995], [LAKE und FERREIRA, 2002] und [BUDAI und DEKKER, 2004] wird das Problem nicht vereinfacht.

[GRIMES, 1995] und [LAKE und FERREIRA, 2002] benutzen lediglich heuristische Algorithmen, während [BUDAI und DEKKER, 2004] und [OYAMA und MIWA, 2006] auch kleinere Fallstudien präsentieren wo die optimale Lösung noch in annehmbarer Zeit (weniger als 10 Stunden) findbar ist. So kann die Güte der von den heuristischen Algorithmen gefundenen Lösungen mit den optimalen verglichen werden.

In [OYAMA und MIWA, 2006] wird der Suchraum durch die Aufteilung des Einplanungsproblems in zwei unabhängige Teilprobleme verringert. Für zwei der drei vorgestellten Fallstudien konnte die optimale Lösung gefunden werden, während für die dritte nur noch eine Approximation (suboptimale Lösung) findbar war.

Tabelle gibt 2.6 einen Überblick über die in diesem Kapitel untersuchten Verfahren zur Einplanung von Gleisinstandhaltungsmaßnahmen. Zur Übersicht wurde das im Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit eingeführte Verfahren hierin eingeordnet.

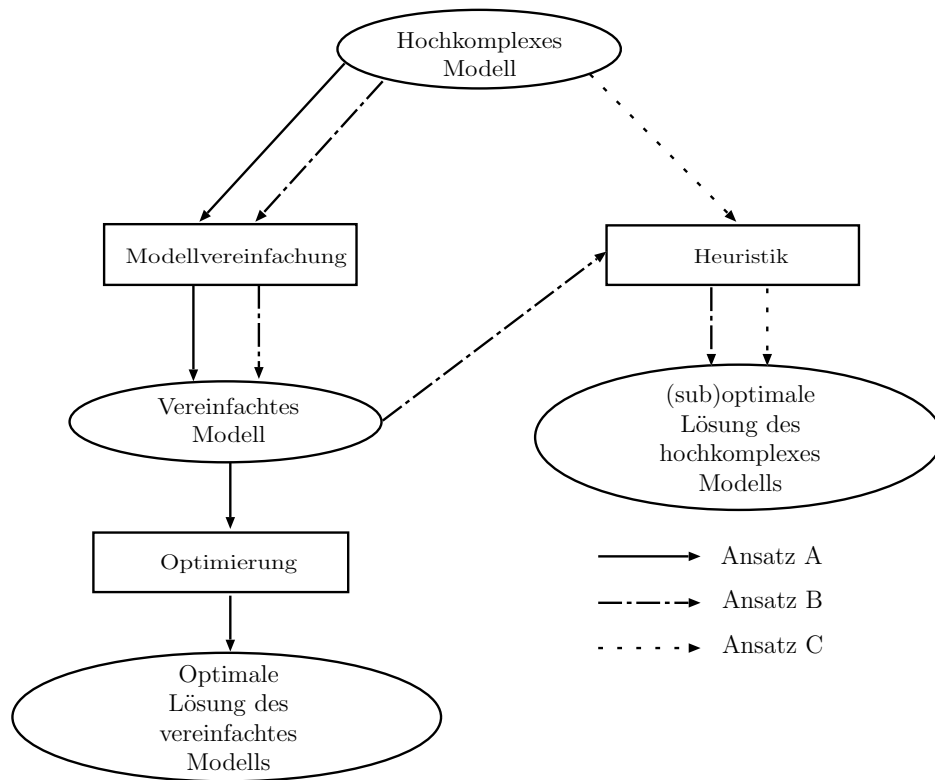


Abbildung 2.7: Mögliche Ansätze zur Lösung hochkomplexer Optimierungsprobleme

Tabelle 2.6: Übersicht der dargestellten Verfahren zur Planung von Gleisstandhaltungsmaßnahmen

Region	Ansatz	Zielfunktion	Optimierungs- verfahren	Software- paket	Prognose- verfahren	Rechenzeit für ca. 1000 Gleisabschnit- te	Planungs- horizont
Groß- britannien	[GRIMES, 1995]	Profitmaximierung, Kostenminimierung	Genetische Algo- rithmen	Eigenent- wicklung	Konstante Alterungs- rate	k. A.	k. A.
Australien	[LAKE und FERREIRA, 2002]	Minimierung der Kosten und der Konflikten mit planmäßigem Betrieb	Simm. anealing, Local search, Multip. LS, Tabu search	Eigenent- wicklung	Keins, da Aufgabenliste vorgegeben	Lösungsgüte proportional zur Rechenzeit	1 Woche
Korea	[OH et al., 2006]	Minimierung des Aufwands unter Einhaltung der Qua- litätsvorgaben, Kostenmini- mierung	Ganzzahlige lineare Optimie- rung	CPLEX	Konstante Alterungs- raten	Optimale Lösung ca. 6 Std., an- nehmbarer Lösungen innerhalb von 1 Std.	5 Jahre
Japan	[OYAMA und MIWA, 2006]	Maximierung der gesamten Qualitätsverbesserung	Ganzzahlige lineare Optimie- rung	XPRESS- MP	Exponentielle Glättung	Optimale Lösung ca. 2 Std., an- nehmbarer Lösungen innerhalb von 30 Sek.	1 Jahr
Niederlande	[BUDAI und DEKKER, 2004]	Minimierung der Kosten durch Streckensperrungen	Min to Max, Max to Min, CEPFS	CPLEX 7.1	Keins, da Aufgabenliste vorgegeben	Je nach Szenario und Heuristik, zwi- schen 3 Min. und ca. 4 Std.	2 Jahre
Portugal	[VALE et al., 2011]	Minimierung der Kosten unter Einhaltung der Qua- litätsvorgaben	Ganzzahlige lineare Optimie- rung	CPLEX	Konstante Alterungs- raten	k. A.	3 Monate
Deutschland	Vorliegende Arbeit	Maximierung der gesamten Qualitätsverbesserung un- ter Einhaltung der Quali- tätsvorgaben, Kostenmini- mierung	Heuristik eigener Entwicklung	Eigenent- wicklung	Hybrides Modell	Unter 1 Sek.	1 Jahr

## 2.7 Fazit

Das vorliegende Kapitel stellt eine allgemeine Beschreibung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie vor. Es wurden sowohl etliche Alterungsmodelle der Gleisgeometrie als auch auf künstlicher Intelligenz basierende Einplanungsverfahren für die Instandhaltungsmaßnahmen rezensiert.

Aus den hier präsentierten Alterungsmodellen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden: Generell können Modelle als stochastisch oder deterministisch eingestuft werden. Für kurz- und mittelfristige (bis ein Jahr) Prognosen, bieten deterministische Modelle eine befriedigende Lösung an [MIWA et al., 2000]. Doch für eine langfristige Prognose ist die Streuung des Alterungsprozesses zu groß [MEIER-HIRMER, 2007].

Die Einplanung der Instandhaltung der Gleisgeometrie stellt ein Optimierungsproblem dar, für das es kein Standardverfahren gibt, sondern dieses muss den Einzelheiten des Instandhaltungsprozesses, der Prioritäten und Ziele des Betreibers und der Komplexität des instand zu haltenden Netzes jeweils angepasst werden. Deshalb stellt die Entwicklung eines solchen Verfahrens eine herausfordernde ingenieurwissenschaftliche Aufgabe dar. Deutlich ist im Rahmen dieses Kapitel geworden, dass der Einsatz von Algorithmen künstlicher Intelligenz ein vielversprechendes Mittel zur Automatisierung und Optimierung der Einplanung der Instandhaltung der Gleisgeometrie ist.

Darüber hinaus geht aus Abb. 1.2 hervor, dass ein Einplanungsverfahren nur ein Teil des Instandhaltungsprozesses ist. Im Hinblick darauf wäre selbst das beste Einplanungsverfahren wirkungslos wenn nicht kontraproduktiv wenn es sich nicht harmonisch mit den anderen Bausteinen des Prozesses ergänzt.

## Kapitel 3

# Modellierung und Simulation der Alterungs- und Instandsetzungsprozesses des Gleisgeometriezustands

Eine wesentliche Komponente der in dieser Arbeit angestrebten Optimierungsmethode ist eine solide stochastische Modellierung des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie. In diesem Kapitel werden dafür ein Prozessmodell und eine Systemidentifikationsmethode eingeführt. Die Methode setzt ein *Grey Box* Modell ein, d. h. die Modellstruktur und ihre Einschränkungen werden auf der Basis von Vorkenntnissen über den zu identifizierenden Prozess vorgegeben. Die Werte des Parametersatzes, die die gemessenen Werte am besten angleichen, werden dann mittels Ausgleichsrechnung untersucht. Aus der Fachliteratur [VEIT, 2007a, MEIER-HIRMER, 2007] ist es bekannt, dass der Verlauf der Gleisgeometriefehler einen exponentiellen Anstieg aufweist. Daher wird für die Ausgleichsrechnung das Levenberg-Marquardt Verfahren [MARQUARDT, 1963], ein numerischer Optimierungsalgorithmus zur Lösung nichtlinearer Ausgleichs-Probleme mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate, angewendet. Zuletzt wird die Methode anhand einer Fallstudie mit realen Daten aus einer französischen TGV Strecke validiert.

### 3.1 Einleitung

Die Gleisgeometrie zu messen und innerhalb der vorgegebenen Fehlergröße aufrecht zu halten, ist eine grundlegende Aufgabe des Gleisinstandhaltungsprozesses. Indem der gleisgeometrische Fehler den Fahrkomfort und das Entgleisungsrisiko repräsentiert, muss bei Überschreitung der vorgegebenen maximalen Fehler die zugelassene Fahrtgeschwindigkeit reduziert werden. Daher ist die Gleisgeometrie ein Merkmal der Fahrqualität und -sicherheit. Aufgrund dessen werden die geometrischen Merkmale des Gleises

regelmäßig gemessen.

Abb. 3.1 zeigt den Verlauf der Längshöhenfehler  $NL$  (aus dem französischen *Nivellement longitudinal*) auf einem Streckensektor von 1 km einer TGV Strecke für die letzten 20 Jahre. Die Kreuze stellen die tatsächlichen Messpunkte dar während die durchgehende Linie aus ihrer Interpolation mittels Splines resultiert. Aus Vertraulichkeitsgründen werden die Maßeinheiten nicht gezeigt. Der Parameter  $NL$  ist die durchschnittliche Abweichung der Schienen von der idealen Längshöhe und wird von der SNCF als Merkmal der allgemeinen Gleisgeometriefehler angenommen, (vgl. Abschnitt 2.2).  $NL$  wächst allmählich, dem Verschleiß der Gleisgeometrie entsprechend. Die Reduzierung von  $NL$  ist im Gegensatz ein diskretes Ereignis, das nur bei Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme stattfindet. In Abb. 3.1 stellen die vertikalen Strichlinien die für den Gleisgeometriefehler relevantesten Maßnahmen dar: Stopfarbeiten. Die Höhe jeder Linie entspricht dem jeweils wirklich gestopften Anteil des Streckensektors. Die für die Durchführung der Gleisinstandhaltung erforderlichen technischen und menschlichen Ressourcen sind ein wesentlicher Kostenfaktor des Eisenbahnbetriebs [ESVELD, 2001]. Zudem müssen die präventiven Stopfarbeiten bis zu drei Jahren im Voraus geplant werden.

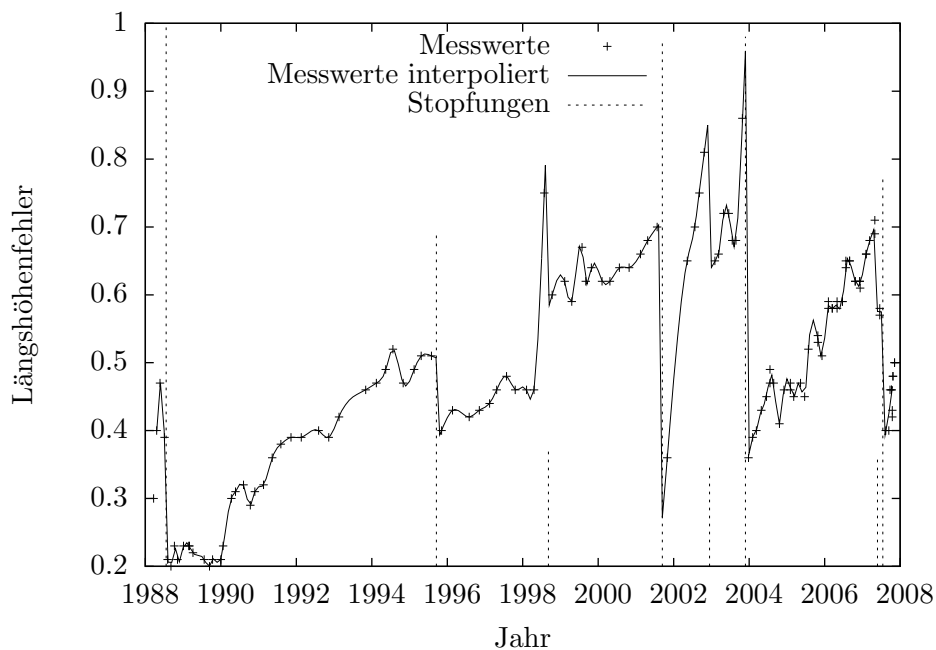


Abbildung 3.1: Verlauf des Längshöhenfehlers und durchgeführte Stopfeingriffe auf einem Hochgeschwindigkeitsstreckensektor.

Aus diesen Fakten lässt sich die hohe Komplexität des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie folgern und damit die Schwierigkeit der Vorhersage der Auswirkung potenzieller Prozessänderungen. In dieser Hinsicht ist die Möglichkeit, den Alterungs-



und Instandsetzungsprozess zu simulieren, von großer Bedeutung. In diesem Kapitel wird eine Modellierungs- und Simulationsmethode für diesen Prozess vorgestellt. Auf der Basis von langjähriger Messwertsammlung wird er als ein stochastischer Prozess beschrieben. Daher wird das Monte Carlo Verfahren für die Realisierung der Simulation eingesetzt.

## 3.2 Prozessmodell

Mit Rücksicht sowohl auf das vorgenommene Ziel, Monte Carlo Simulationen des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie zu realisieren, als auch auf die in Abschnitt 2.4 rezensierte Fachliteratur, können zwei grundlegende Anforderungen an das zu entwickelnde Modell formuliert werden:

- Das Anwachsen des Gleisgeometriefehlers wird anhand einer exponentiellen Funktion beschrieben.
- Nicht deterministische Merkmale des Prozesses werden explizit als stochastische Variablen betrachtet.

Das hiermit eingeführte Modell erfüllt beide dieser Anforderungen. Sowohl die exponentielle Verschlechterungsrate  $b$  als auch der Wert von  $NL$  nach einem Stopfeingriff werden als lognormalverteilte Variablen modelliert, die von der Anzahl der akkumulierten Stopfeingriffe  $n$  abhängen. Zudem wird in Abschnitt 3.4.1 die im Modell implizit angenommene statistische Unabhängigkeit von  $NL_{init}$  und  $b$  untersucht und in Abschnitt 3.4.2 wird die postulierte Lognormalität bestätigt.

### 3.2.1 Modellpostulate

Das in dieser Arbeit eingeführte Prozessmodell basiert auf den folgenden zwei Postulaten, nämlich:

1. Der nach der  $n - ten$  Stopfung erreichte Längshöhenfehler  $NL_{init_n}$  kann als eine lognormalverteilte stochastische Variable, d. h.

$$NL_{init_n} \sim \mathcal{LN}(\mu_{NL_{init}}(n), \sigma_{NL_{init}}^2(n)) \quad (3.1)$$

beschrieben werden.

2. Der Verlauf der Fehlergröße zwischen zwei Stopfeingriffen kann als eine exponentielle Funktion der Form

$$NL(n, t_n, t) = NL_{init_n} e^{b_n(t-t_n)} + \varepsilon(t) \quad (3.2)$$

beschrieben werden, wobei  $t_n$  die Zeit ist, als der letzte Stopfeingriff stattgefunden hat und  $b_n$  eine lognormalverteilte stochastische Variable ist, d. h.

$$b_n \sim \mathcal{LN}(\mu_b(n), \sigma_b^2(n)) \quad (3.3)$$

und  $\varepsilon_n(t)$  eine normalverteilte Variable mit Mittelwert 0 ist, d. h.

$$\varepsilon_n(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2) \quad (3.4)$$

Die erste Annahme beruht auf der Studie der Auswirkung der Stopfeingriffe auf Hochgeschwindigkeitsgleisen von [ANTONI, 2010]. Die zweite Annahme basiert auf dem Modell von [VEIT, 2007b], das den exponentiellen Anstieg des Gleisgeometriefehlers zwischen Stopfeingriffen postuliert. Zudem soll  $\varepsilon(t)$  für die Messunsicherheit stehen, daher ist sie vom Gleisalter und daraufhin von  $n$  unabhängig. Eine weitere implizite Annahme ist, dass  $NLinit_n$  und  $b_n$  statistisch unabhängig sind, d. h. der nach einem Stopfeinsatz erreichte Längshöhenfehler hat keinen Einfluss auf die darauf folgende Verschlechterungsrate  $b_n$ . Ihre Gültigkeit wird in Abschnitt 3.4 bestätigt. Diesen Annahmen entsprechend sind für die Anwendung des Modells Ausdrücke für  $\mu_{NLinit}(n)$ ,  $\sigma_{NLinit}(n)$ ,  $\mu_b(n)$ , und  $\sigma_b(n)$  notwendig. Um diese zu erhalten, ist eine Datenbank mit langjährigen Messwerten der Längshöhenfehler auf vielen Streckenkilometern und den dort durchgeführten Stopfarbeiten erforderlich.

### 3.2.2 Identifikation der Modellparameter

Ziel dieses Abschnittes ist die statistische Beschreibung von  $NLinit_n$  und  $b_n$  unter Annahme ihrer Lognormalität, d. h. die Ermittlung von  $\mu_{NLinit}(n)$ ,  $\sigma_{NLinit}(n)$ ,  $\mu_b(n)$ , und  $\sigma_b(n)$  auf der Basis von Messdaten. Dafür werden zuerst die in den Messdaten enthaltenen Realisierungen (Stichprobe) von  $NLinit_n$  und  $b_n$  durch Ausgleichsrechnung bezogen. Dann werden die Mittelwerte und Varianzen der Logarithmen der Stichproben berechnet und schließlich die Funktionen  $\mu_{NLinit}(n)$ ,  $\sigma_{NLinit}(n)$ ,  $\mu_b(n)$ , und  $\sigma_b(n)$  durch Ausgleichsrechnung ermittelt.

#### Ermittlung der Stichproben

$NL_{i,n}(t)$  und  $\Upsilon_{i,n}$  seien wie in Gleichungen 3.5, 3.6 und 3.7 definiert. Dann besteht das Minimierungsproblem daraus,  $NLinit_{i,n}$  und  $b_{i,n}$  zu ermitteln, so dass die Summe der Fehlerquadrate  $\Upsilon_{i,n}$  minimiert wird.

$$NL_{i,n} = \{NL_i(t_{s_n}), \dots, NL_i(t_{s_{n+1}})\} \quad (3.5)$$

$$\widehat{NL}_{i,n}(t) = NLinit_{i,n} e^{b_{i,n} t} \quad (3.6)$$

$$\Upsilon_{i,n} = \sum_{t=t_{s_n}}^{t_{s_{n+1}}} (NL_i(t) - \widehat{NL}_{i,n}(t))^2 \quad (3.7)$$

mit

- $t_{s_n}, t_{s_{n+1}}$  : Zeit des  $n$ -ten bzw.  $(n + 1)$ -ten Stopfeingriff seit der letzten Gleis-  
erneuerung auf Sektor  $i$   
 $NL_{i,n}$  : Verfügbare Messreihe von  $NL$  auf Sektor  $i$  zwischen dem  $n$ -ten und  
dem  $(n + 1)$ -ten Stopfeingriff  
 $\widehat{NL}_{i,n}(t)$  : Auf Basis der Messreihe  $NL_{i,n}$  identifizierte Exponentialfunktion  
 $\Upsilon_{i,n}$  : Summe der Fehlerquadrate

Diese Ausgleichungsrechnung wird für jede Periode zwischen Stopfeingriffen in jeder Messreihe durchgeführt (eine Reihe pro 1 km langen Gleisabschnitt, insgesamt etwa 250), wodurch für jeden Abschnitt  $i$  und jede Periode  $n$  die Parameter  $NL_{init_{i,n}}$  und  $b_{i,n}$  ermittelt werden. Zudem wird der Mittelwert der Fehlerquadrate für die Charakterisierung des Messrausches  $\varepsilon_n(t)$  eingesetzt.

Aus der Fachliteratur ist bekannt, dass die Gleisgeometrie in den ersten Monaten nach einer Stopfarbeit ein unregelmäßiges Verhalten aufweist [QUIROGA und SCHNIEDER, 2010a, MEIER-HIRMER, 2007, LICHTBERGER, 2010]. Deshalb werden Messungen innerhalb der ersten drei Monate nach einer Stopfung nicht berücksichtigt. Weiterhin wird als Mindestzeit zwischen Stopfungen ein Jahr vorausgesetzt, denn kürzere Perioden könnten zu wenige Messpunkte für eine Ausgleichungsrechnung enthalten.

### Bezug der relevanten statistischen Merkmale der Stichproben

Da die Lognormalität von  $NL_{init_n}$  und  $b_n$  angenommen wird, werden ihre Logarithmen als normalverteilt betrachtet. Also werden als nächster Schritt die Mittelwerte und Varianzen der Logarithmen der Stichproben anhand von Gl. 3.8 ermittelt.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{und} \quad s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (3.8)$$

mit

- $x_i$  : in der Stichprobe verfügbare Realisierungen einer stochastischen  
Variablen  $X$   
 $N$  : Gesamtzahl der in der Stichprobe verfügbaren Realisierungen von  
 $X$   
 $\bar{x}$  : Mittelwert der Stichprobe  
 $s^2$  : korrigierte Stichprobenvarianz

Die Anzahl von in jeder Messreihe verfügbaren Stopfeingriffen ist für jede Reihe unterschiedlich. Also kann z. B. die eine Reihe nur fünf, eine andere zehn Stopfeingriffe beinhalten. Dies deutet darauf hin, dass die Anzahl der Messreihen, die mindestens  $n$  Perioden zwischen Stopfungen aufweisen, abnehmen wird, wenn  $n$  wächst. Zudem können nicht von allen in der Datenbank vorhandenen Perioden ihre Parameter  $NL_{init_{i,n}}$  und  $b_{i,n}$  herangezogen werden, weil einige zu kurz sind bzw. zu wenige Messpunkte aufweisen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Wenn zu wenige Realisierungen von  $NL_{init_{i,n}}$  und  $b_{i,n}$

wo  $n = n_0$  vorliegen, ist eine Einschätzung der Merkmale ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einem zu großen Konfidenzintervall bzw. einem zu niedrigen Konfidenzniveau behaftet. In der Folge wird die für die Einschätzung der statistischen Merkmale der jeweiligen  $N\text{Limit}_n$  und  $b_n$  (nämlich ihre Mittelwerte und Varianzen) erforderliche Stichprobengröße untersucht. Das Vertrauensintervall des Erwartungswertes eines normalverteilten Merkmals mit unbekannter Varianz kann anhand von Gl. 3.9 ermittelt werden [SACHS und HEDDERICH, 2006, S. 265].

$$[\bar{x}_u ; \bar{x}_o] = \left[ \bar{x} - t(1 - \frac{\alpha}{2}, N - 1) \frac{s}{\sqrt{N}} ; \bar{x} + t(1 - \frac{\alpha}{2}, N - 1) \frac{s}{\sqrt{N}} \right] \quad (3.9)$$

mit

$[\bar{x}_u ; \bar{x}_o]$  : Vertrauensintervall des Erwartungswertes eines normalverteilten Merkmals  $X$

$\alpha$  : Statistisches Signifikanzniveau des Vertrauensintervalls

$N$  : Größe der Stichprobe

$t(p, N - 1)$  :  $p$ -Quantil der studentschen  $t$ -Verteilung mit  $N - 1$  Freiheitsgraden.

Demnach müssen das statistische Signifikanzniveau  $\alpha$  (Anteil der Schätzintervalle die den unbekannten Erwartungswert nicht überdecken) und die gewünschte Größe des Vertrauensintervalls  $[\bar{x}_o - \bar{x}_u]$  festgelegt werden, um die notwendige Stichprobengröße zu bestimmen. Die Signifikanz wird auf  $\alpha = 0,1$  gesetzt. Da die Standardabweichung von  $N\text{Limit}_n$  und  $b_{i,n}$  i. d. R. viel kleiner als ihr Mittelwert ist (vgl. Abschnitt 3.4) kann das Vertrauensintervall im Bezug zur Stichprobenstandardabweichung  $s$  relativ großzügig sein. Also wird ein Vertrauensintervall von maximal  $1,0s$  vorausgesetzt. Dies gilt für  $N \geq 18$ , vgl. Gl. 3.11.

$$\bar{x}_o - \bar{x}_u \stackrel{3.9}{=} 2t(1 - \frac{\alpha}{2}, N - 1) \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.10)$$

$$\text{Wenn } N = 18 \quad \wedge \quad \alpha = 0,1 \quad \wedge \quad 2 \cdot 0,5s \geq \bar{x}_o - \bar{x}_u \Rightarrow$$

$$1,0s \geq 2t(1 - \frac{0,1}{2}, 18 - 1) \frac{s}{\sqrt{18}}$$

$$1,0s \geq 22,109 \frac{s}{4,243}$$

$$1,0 \geq 0,9945 \quad (3.11)$$

Zudem kann das Vertrauensintervall der Standardabweichung eines normalverteilten Merkmals mittels Gl. 3.12 herangezogen werden [SACHS und HEDDERICH, 2006, S. 278].

$$[\bar{s}_u ; \bar{s}_o] = \left[ s \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, n-1)}} ; s \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(1 - \frac{\alpha}{2}, n-1)}} \right] \quad (3.12)$$

$[\bar{s}_u ; \bar{s}_o]$  : Vertrauensintervall der Standardabweichung eines normalverteilten Merkmals  $X$

$\chi^2(p, n - 1)$  :  $p$ -Quantil der  $\chi^2$ -Verteilung mit  $k$  Freiheitsgraden.

Vorausgesetzt wird ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,1$ . Da es sich um die Einschätzung der Standardabweichung handelt, wird ein kleineres Vertrauensintervall, nämlich von maximal  $0,55s$ , vorausgesetzt. Also ergibt sich eine minimale Stichprobengröße von  $N \geq 22$ , s. Gl. 3.14.

$$\bar{s}_o - \bar{s}_u = s \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(1 - \frac{\alpha}{2}; n-1)}} - s \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, n-1)}} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } N = 22 \wedge \alpha = 0,1 \wedge 0,5s &\geq \bar{s}_o - \bar{s}_u \\ 0,55s &\geq s \sqrt{\frac{22-1}{\chi^2(1 - \frac{0,1}{2}; 22-1)}} - s \sqrt{\frac{22-1}{\chi^2(\frac{0,1}{2}, 22-1)}} \\ 0,55 &\geq \sqrt{\frac{21}{11,591}} - \sqrt{\frac{21}{32,671}} \\ 0,55 &\geq 0,544 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Insofern werden von der Stichprobe Realisierungen mit  $n = n_0$  nur dann berücksichtigt, wenn zumindest 22 Paare  $(NLinit_{i,n}, b_{i,n})$  mit  $n = n_0$  verfügbar sind.

Die Einschätzung von  $\sigma_\varepsilon^2$  ist hingegen viel einfacher. Da es das Messrauschen repräsentiert, hängt es weder vom Sektor noch vom Zeitpunkt ab und wird deshalb pauschal als der Mittelwert aller in Abschnitt 3.2.2 berechneten  $\Upsilon_{i,n}$  bestimmt.

### Ermittlung der Funktionen $\mu_{NLinit}(n)$ , $\sigma_{NLinit}(n)$ , $\mu_b(n)$ , und $\sigma_b(n)$

Der letzte Schritt der Parameteridentifizierungsmethode besteht aus der Ermittlung der Funktionen, die jeweils die vier stochastischen Merkmale für die verschiedenen Stopfperioden beschreiben. Dafür werden Funktionsformen verwendet, die sich den geschätzten Werten möglichst gut anpassen lassen. Folglich wird für die Ausgleichungsrechnung der Mittelwerte von  $NLinit(n)$  eine Funktion der Form 3.15 bezogen, während für die Ausgleichungsrechnung der Mittelwerte von  $b(n)$  und die Ausgleichungsrechnung der Standardabweichungen von  $NLinit(n)$  und  $b(n)$  Funktionen der Form 3.16 bezogen werden.

$$\alpha - \beta e^{-\theta n} \quad (3.15)$$

$$\alpha + (\beta n)^\theta \quad (3.16)$$

### Für die Ausgleichungsrechnungen anwendbares Verfahren

Da es sich um ein nicht lineares Minimierungsproblem handelt, wird es mit Hilfe der *LevMar* Bibliothek [LOURAKIS, 2004], eine Realisierung des Levenberg-Marquardt Verfahrens [MARQUARDT, 1963], gelöst. Hier handelt es sich um einen numerischen Optimierungsalgorithmus zur Lösung nichtlinearer Ausgleichungsrechnungen mit Hilfe der

Methode der kleinsten Quadrate. Es kann als eine Kombination des Gradientenverfahrens und des Gauß-Newton-Verfahrens betrachtet werden. Je weiter entfernt die aktuelle Lösung vom lokalen Optimum liegt, desto ähnlicher verhält es sich wie das Gradientenverfahren, d. h. langsam, aber mit gewährleisteter Konvergenz. Im Gegensatz dazu, verhält es sich je näher die aktuelle Lösung am lokalen Optimum liegt, desto ähnlicher wie das Gauß-Newton-Verfahren.

### 3.2.3 Monte Carlo Simulationsprozess

Durch Monte Carlo Simulation können Realisierungen von stochastischen Prozessen erzeugt werden, vorausgesetzt, dass eine Beschreibung ihrer stochastischen Merkmale vorhanden ist. Das Verfahren wird in vielen Wissenschaftsfeldern für die Simulation von physikalischen und mathematischen Systemen angewendet. Eine umfassende Beschreibung des Verfahrens und seine möglichen Anwendungen kann in [KROESE et al., 2011] gefunden werden.

Nach Durchführung der in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Systemidentifikation können Monte Carlo Simulationen des Alterungs- und Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie durchgeführt werden. Für die Ausführung einer Simulation sind neben den durch die Systemidentifikation ermittelten stochastischen Merkmalen zusätzlich lediglich folgende Parameter zu bestimmen:

1. die erwünschten Start- und Endzeiten oder -zustand (z. B. zehnte Stopfung erreicht)
2. der Simulationsschritt
3. und entweder
  - (a) die Termine der Stopfeingriffe oder
  - (b) eine Eingriffsschwelle, bei deren Erreichung immer ein Stopfeingriff stattfinden soll

Diese Parameter werden vom Anwender dem Ziel der Simulation entsprechend vorgegeben.

Der Simulationsprozess wird in Abb. 3.2 in Form eines Flussdiagramms dargestellt und kann wie folgt beschrieben werden:

1. Die Variablen  $n$  (Stopfperiode),  $t$  (Simulationszeit) und  $t_{ls}$  (Zeit seit dem letzten Stopfeingriff) deklarieren und auf 0 setzten.
2.  $N_{Linit}$  und  $b_n$  entsprechend den Modellannahmen (vgl. Kapitel 3.2.1) nach Gl. 3.17 bzw. Gl. 3.18 würfeln.

$$\mathcal{LN}(\mu_{N_{Linit}}(n), \sigma_{N_{Linit}}^2(n)) \quad (3.17)$$

$$\mathcal{LN}(\mu_b(n), \sigma_b^2(n)) \quad (3.18)$$

3. Das Messrauschen  $\varepsilon(t)$  entsprechend Gl. 3.4 als  $\mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$  würfeln.
4. Den aktuellen Messwert entsprechend Gl. 3.2 nach Gl. 3.19 bestimmen.

$$NL(n, t_n, t) = NLinit_n e^{b_n(t-t_n)} + \varepsilon(t) \quad (3.19)$$

5. Die Simulationszeit um  $T_{sim}$ , den Simulationsschritt, inkrementierten.
6. **Wenn** der vorgegebene Stopftermin oder die Eingriffsschwelle erreicht wurde, **dann**  $n$  um eins inkrementieren,  $t_{ls} = t$  setzen und zu Schritt 2, **sonst** weiter zum nächsten Schritt.
7. **Wenn** die Endzeit oder der Endzustand erreicht wurde, **dann** Simulation beenden, **sonst** weiter zu Schritt 3.

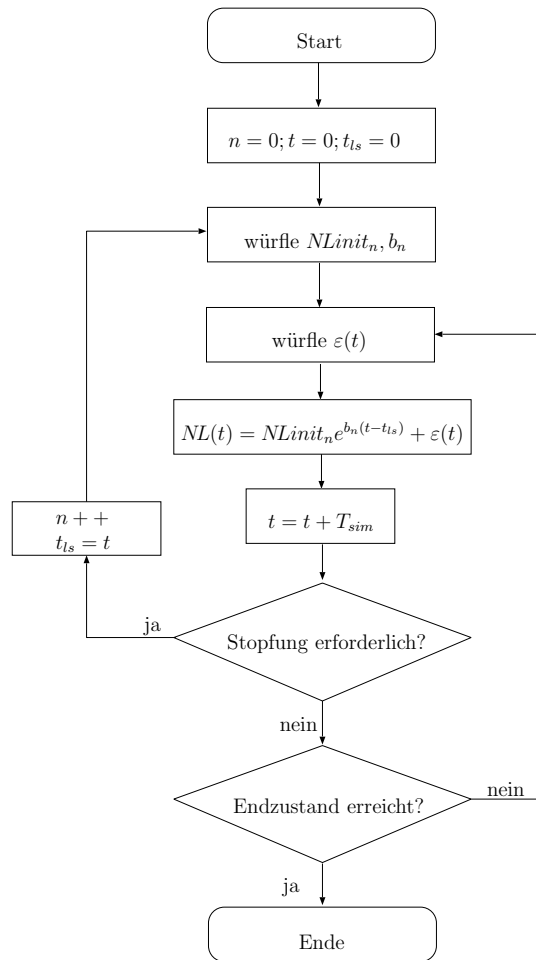


Abbildung 3.2: Flussdiagramm des eingesetzten Monte Carlo Simulationsverfahren.  $t$  ist die Simulationszeit,  $t_{ls}$  die Zeit seit dem letzten Stopfeingriff,  $T_{sim}$  der Simulationsschritt,  $n$  die Stopfperiode, und  $NLinit_n$  und  $b_n$  wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt.

Das Verfahren wird in Abschnitt 3.4 anhand eines Anwendungsbeispiels mit simulierten Prozessrealisierungen illustriert.

### 3.3 Anpassung an variierende Einflussfaktoren

Der Alterungsprozess der Gleisgeometrie hängt von vielen Faktoren ab. Das in dieser Arbeit angewendete Prozessmodell beruht auf der Annahme, dass diese Faktoren im Laufe des Simulationsablaufs konstant bleiben. In der Literatur finden sich zahlreiche Studien zu dem Thema. Diese werden in [UBALDE et al., 2005] rezensiert, wonach die Auswirkung der Änderung eines Parameters  $P$  auf den Gleisgeometriefehler mit einer Funktion der Form 3.21 beschrieben werden kann, wo  $P_n$  und  $P_0$  die Werte des Parameters nach bzw. vor der Änderung sind, und  $\alpha_P$  ein Skalierungsfaktor, der für die relevantesten Einflussparameter von den meisten Betreibern bekannt ist.

$$\Delta NL(t) = NL(t) - NL(t_n) \quad (3.20)$$

$$\frac{\Delta NL(t|P = p_1)}{\Delta NL(t|P = p_0)} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\alpha_P} \quad (3.21)$$

mit

- $t_n$  : Zeit des  $n$ -ten Stopfeingriffs
- $p_1, p_0$  : Wert des Parameters  $P$  vor und nach dessen Änderung
- $\alpha_P$  : mit  $P$  assoziierter Skalierungsfaktor.

Aus der Annahme, dass der nach einem Stopfeinsatz erreichte Längshöhenfehler nicht vom Parameter  $P$  beeinflusst wird, folgt Gl. 3.22.

$$NLinit_n(t = 0|P = p_0) = NLinit_n(t = t_n|P = p_1) \quad (3.22)$$

Dieser Annahme nach kann Gl. 3.27 für die Konvertierung einer mit dem Parameter  $P = p_0$  ausgeführten Simulation in einer mit dem Parameter  $P = p_n$  ausgeführten Simulation benutzt werden. Also könnten z. B. Messreihen aus einem Streckensektor mit Betriebsgeschwindigkeit 250 km/h für Simulationen mit 300 km/h benutzt werden, vgl. Abschnitt 3.4.4.

$$\Delta NL(t|P = p_1) := NL(t|P = p_1) - NL(t = t_n|P = p_1) \quad (3.23)$$

$$\stackrel{3.22}{=} NL(t|P = p_1) - NL(t = t_n|P = p_0) \quad (3.24)$$

$$\stackrel{3.21}{=} \Delta NL(t|P = p_0) \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\alpha_P} \quad (3.25)$$

$$= (NL(t|P = p_0) - NL(t = t_n|P = p_0)) \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\alpha_P} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} NL(t|P = p_1) &= (NL(t|P = p_0) - NL(t = t_n|P = p_0)) \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\alpha_P} \\ &+ NL(t = t_n|P = p_0) \end{aligned} \quad (3.27)$$



Auch wenn die in der Datenbank enthaltenen Messreihen Änderungen der Einflussparameter unterliegen (z. B. tägliche Tonnage) kann die Systemidentifikation durch Anwendung der Gl. 3.28 erfolgen.

$$NL(t|P = p_0) = (NL(t|P = p_1) - NL(t = t_n|P = p_1))\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\alpha_P} + NL(t = t_n|P = p_1) \quad (3.28)$$

Die Gültigkeit von Gl. 3.28 ist bedingt durch die Gültigkeit von Gl. 3.22 für den Parameter  $P$  sowie dadurch, dass der Skalierungsfaktor  $\alpha_P$  bekannt sein muss. Ferner müssen die in Betrachtung bezogenen Variierungen von  $P$  innerhalb des Gültigkeitsbereichs von  $\alpha_P$  liegen. So wäre es z. B. nicht realistisch, aus Messreihen mit Betriebsgeschwindigkeit 80 km/h Simulationen mit 300 km/h zu beziehen, denn bei 300 km/h ist der Verschleißprozess von Phänomenen gekennzeichnet, die bei 80 km/h unerheblich sind.

## 3.4 Fallstudie

In diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 3.2.1 vorgestellte Modell mit einer Datenbank einer französischen TGV Strecke angewandt, die die Längshöhenfehlermesswerte von über 20 Jahren auf 250 aufeinander folgenden Streckenabschnitten mit einer Länge von jeweils 1 km umfasst.

### 3.4.1 Untersuchung der statistischen Unabhängigkeit von $NL_{init}$ und $b$

Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, ist eine Annahme des Prozessmodells die statistische Unabhängigkeit von  $NL_{init}$  und  $b$ . Abb. 3.3 zeigt alle in der o. g. Datenbank vorhandenen Paare  $(NL_{init}, b)$ , d. h. den nach einer Stopfmaßnahme erreichten  $NL_{init}$ , und das  $b$  der darauf folgenden Kurve  $NL(t) = NL_{init} e^{bt}$ . Der empirische Korrelationskoeffizient hierzu ist  $r_{NL_{init},b} = -1,103 \cdot 10^{-2}$  (vgl. Gl. 3.29 nach [SCHULZE, 2007, S. 138]), weshalb eine lineare Korrelation auszuschließen ist. Visuell ist eben keine Korrelation erkennbar. Insofern scheint die Annahme plausibel zu sein.

$$r_{NL_{init},b} = \frac{n \sum NL_{init_i} b_i - \sum NL_{init_i} \sum b_i}{\sqrt{n \sum NL_{init_i}^2 - (\sum NL_{init_i})^2} \sqrt{n \sum b_i^2 - (\sum b_i)^2}} \quad (3.29)$$

### 3.4.2 Untersuchung der Lognormalität von $NL_{init}$ und $b$

Die zweite Annahme des Prozessmodells ist die Lognormalität von  $NL_{init_n}$  und  $b_n$ . Zwecks der Untersuchung der Gültigkeit dieser Annahme werden Kolmogorow-Smirnow-Tests für beide Variablen für  $n \in 1, \dots, 10$  durchgeführt. Der Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest (KS-Anpassungstest), ist ein statistischer Test auf Übereinstimmung zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen [STUART et al., 1999]. Mit seiner Hilfe kann

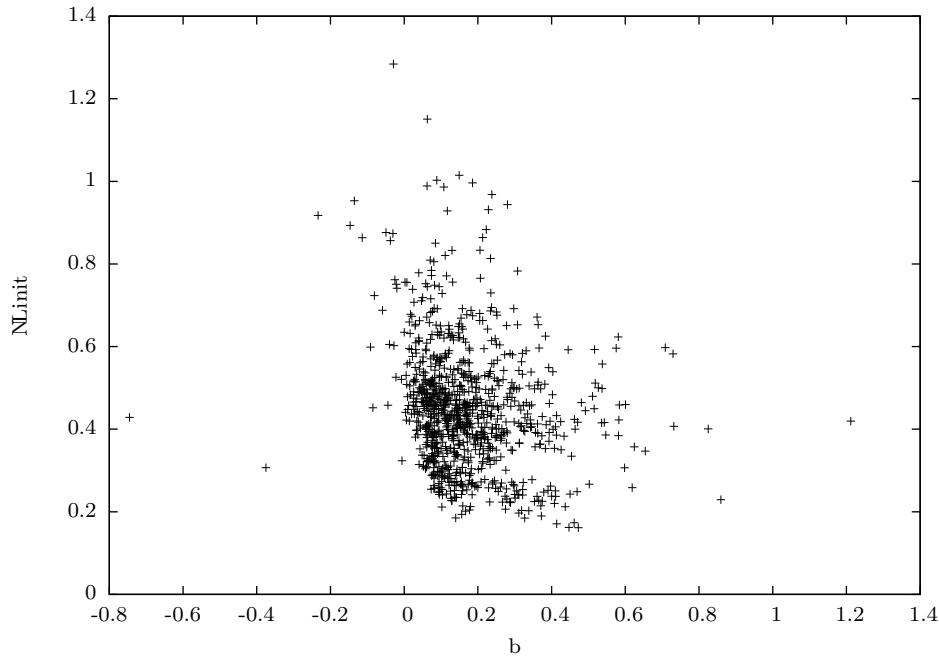


Abbildung 3.3:  $NLimit$  vs  $b$

anhand von Zufallsstichproben geprüft werden, ob eine Zufallsvariable einer zuvor angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt. Der KS-Anpassungstest ist dem Vergleich zweier Merkmale analog zu verstehen. Betrachtet wird ein statistisches Merkmal  $X$ , dessen Wahrscheinlichkeiten in der Grundgesamtheit unbekannt sind. Die zweiseitig formulierten Hypothesen lauten dann:

**Nullhypothese:**  $H_0 : F_x(x) = F_0(x)$

d. h. die Zufallsvariable  $x$  besitzt die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F_0$ .

**Alternativhypothese:**  $H_1 : F_x(x) \neq F_0(x)$

d. h. die Zufallsvariable  $X$  besitzt eine andere Wahrscheinlichkeitsverteilung als  $F_0$ .

Der Kolmogorow-Smirnow-Test vergleicht die empirische Verteilungsfunktion  $F_n$  mit  $F_0$ , mittels der Teststatistik

$$d_n = \|F_n - F_0\| = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)|$$

wobei  $\sup$  das Supremum (obere Schranke) bezeichnet.

Nach dem Gliwenko-Cantelli-Satz strebt die empirische Verteilung gleichmäßig gegen die Verteilungsfunktion von  $X$  (also unter  $H_0$  gegen  $F_0$ ) [DUDLAY, 1999]. Unter  $H_1$

sollten also größere Werte erreicht werden als unter  $H_0$ . Die Teststatistik ist unabhängig von der hypothetischen Verteilung  $F_0$ . Ist der Wert der Teststatistik größer als der entsprechende tabellierte kritische Wert  $d_\alpha$ , so wird die Nullhypothese verworfen.

Der kritische Wert  $d_\alpha$  für ein Konfidenzniveau  $\alpha = 5\%$  wird als  $d_\alpha = 1,36/\sqrt{N}$  berechnet, wobei  $N$  der Größe der Stichprobe entspricht. Wenn  $d_n < d_\alpha$  gilt, wird  $H_0$  angenommen und ansonsten verworfen.

In der Folge werden KS-Anpassungstests für  $NLinit_n$  für  $n \in 1, \dots, 10$  durchgeführt, d. h. für insgesamt 10 stochastische Variablen. Die Nullhypothese ist also jeweils

$$H_0 : NLinit_n \sim \mathcal{LN}(\hat{\mu}_{NLinit}(n), \hat{\sigma}_{NLinit}^2(n)) \quad (3.31)$$

$\hat{\mu}_{NLinit}(n)$  : Mittelwert des natürlichen Logarithmus der Stichprobe von  $NLinit_n$ , d. h.  $NL$  nach der  $n$ -ten Stopfarbeit

$\hat{\sigma}_{NLinit}^2(n)$  : Varianz des natürlichen Logarithmus der Stichprobe von  $NLinit_n$

In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse dargestellt. Für alle Variablen wird die Nullhypothese angenommen.

Tabelle 3.1: Ergebnisse der KS-Anpassungstests für  $NLinit_n$

$n$	$N$	$d_\alpha$	$d_{max}$	$d_\alpha/d_{max}$
1	112	0,0718	0,128	0,558
2	190	0,0544	0,986	0,552
3	177	0,0559	0,102	0,547
4	137	0,113	0,116	0,974
5	96	0,0863	0,138	0,622
6	76	0,0845	0,156	0,542
7	51	0,0893	0,190	0,468
8	31	0,0804	0,244	0,329
9	20	0,158	0,304	0,519
10	13	0,234	0,377	0,621

Auch für den Parameter  $b_n$  wird analog vorgegangen. Zunächst werden KS-Anpassungstests für  $NLinit_n$  für  $n \in 1, \dots, 10$  durchgeführt, d. h. für insgesamt zehn stochastische Variablen. Die Nullhypothese ist also jeweils

$$H_0 : b_n \sim \mathcal{LN}(\hat{\mu}_b(n), \hat{\sigma}_b^2(n)) \quad (3.32)$$

$\hat{\mu}_b(n)$  : Mittelwert des natürlichen Logarithmus der Stichprobe von  $b_n$ , d. h.  $b$  nach der  $n$ -ten Stopfarbeit

$\hat{\sigma}_b^2(n)$  : Varianz des natürlichen Logarithmus der Stichprobe von  $b_n$

Die Ergebnisse werden in Tabelle 3.2 präsentiert. Hier sind auch alle  $d_\alpha$  kleiner als  $d_{max}$ , also werden die Nullhypothesen auch angenommen.

Tabelle 3.2: Ergebnisse der KS-Anpassungstests für  $b_n$ 

$n$	$N$	$d_\alpha$	$d_{max}$	$d_\alpha/d_{max}$
1	112	0,0773	0,128	0,601
2	190	0,0904	0,0986	0,916
3	177	0,0755	0,102	0,738
4	137	0,0781	0,116	0,672
5	96	0,0891	0,138	0,641
6	76	0,143	0,156	0,918
7	51	0,135	0,190	0,710
8	31	0,104	0,244	0,426
9	20	0,137	0,304	0,453
10	13	0,157	0,377	0,416

### 3.4.3 Systemidentifikation

Abb. 3.4 zeigt die geschätzten Mittelwerte und Standardabweichungen von  $NLinit_n$  und die eingepassten Mittelwerte (gepunktete Kurve). Die Höhen der Balken entsprechen den Standardabweichungen. Die Werte der Abb. 3.4 stimmen mit denen von [ANTONI, 2010] überein.

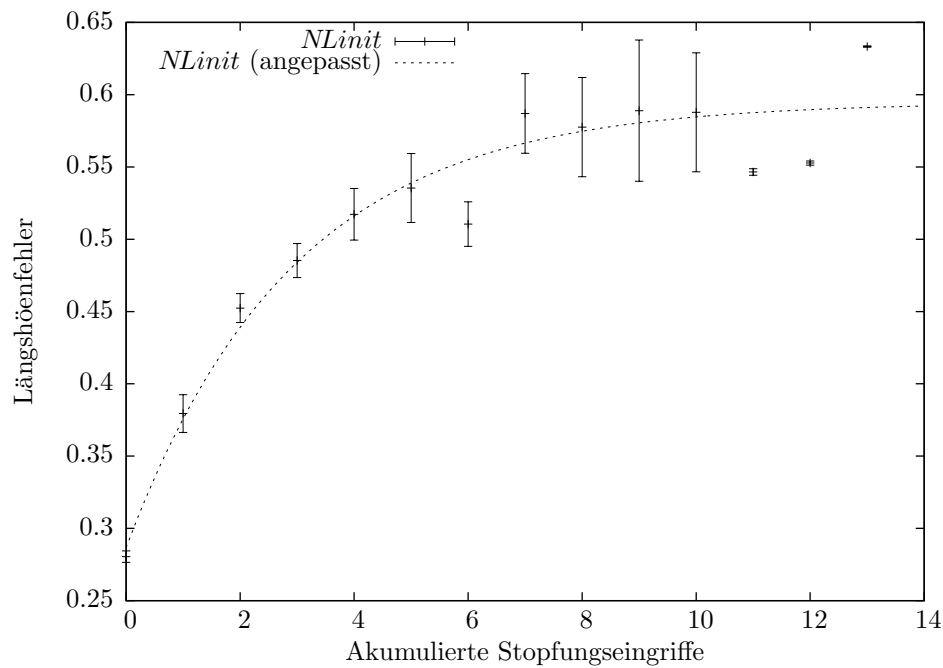


Abbildung 3.4: Geschätzte Mittelwerte und Standardabweichungen und eingepasste Mittelwerte von  $NLinit_n$

Gleichermaßen zeigt Abb. 3.5 geschätzte und eingepasste Mittelwerte und Standardabweichungen von  $b_n$ . Abbildungen 3.6 und 3.7 zeigen die geschätzten Standardabweichungen, die bereits in den Abbildungen 3.4 und 3.5 als Balkenhöhen dargestellt werden sowie die eingepassten Kurven.

In der benutzten Datenbank sind ab dem elften Stopfeingriff weniger als die nach Abschnitt 3.2.2 erforderlichen 22 Realisierungen vorhanden, d. h. es ermangelt an statistischer Signifikanz. Dies wird offensichtlich für die Schätzungen von  $b_n$  für  $n = 11$  und  $n = 13$  in Abb. 3.5. Deshalb werden bei den Ausgleichungsrechnungen Werte von  $NLinit_n$  und  $b_n$  für  $n > 10$  nicht berücksichtigt.

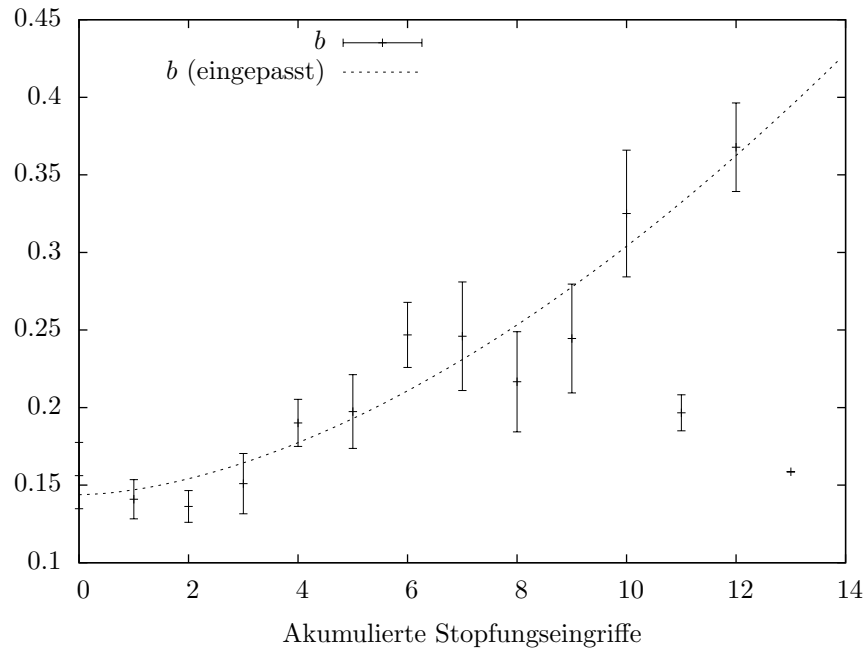
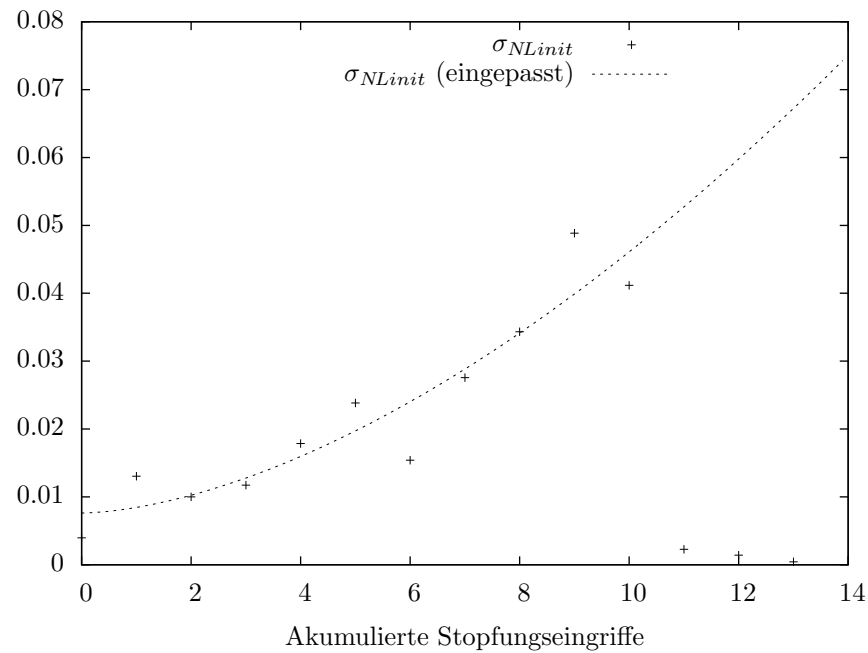
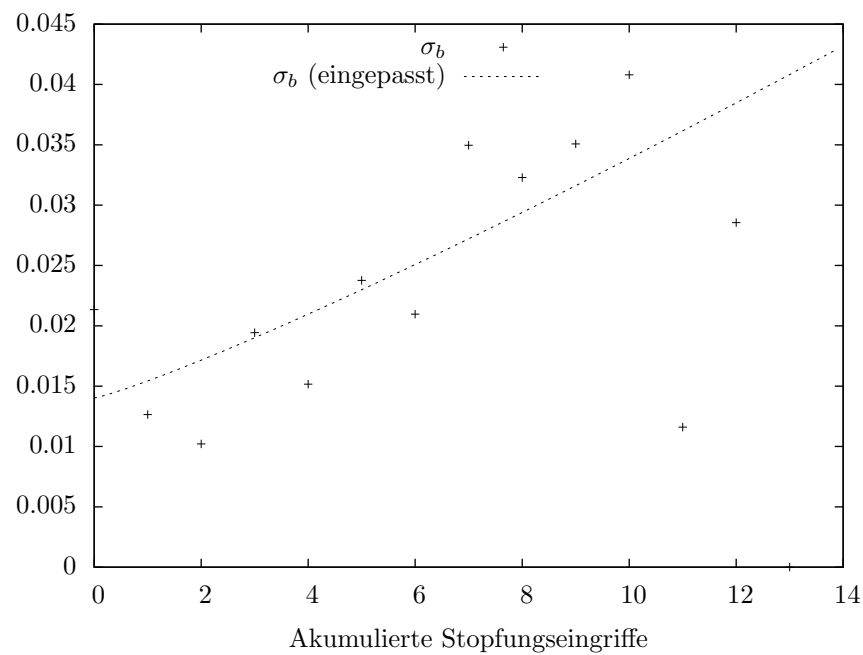


Abbildung 3.5: Geschätzte Mittelwerte und Standardabweichungen und eingepasste Mittelwerte von  $b_n$

Der Mittelwert von  $NLinit(n)$  scheint zu einem gewissen Wert um 0,6 zu konvergieren. Dies stimmt mit den in [ANTONI, 2010] erreichten Ergebnissen überein, wonach das beschleunigte Anwachsen von  $NLinit$  nach den ersten fünf Stopfeingriffen auf eine Setzungsperiode nach der Gleiserneuerung zurückzuführen ist. Der darauf folgende begrenzte Anstieg deutet auf eine gewisse Unabhängigkeit zwischen den akkumulierten Stopfeingriffen  $n$  und  $NLinit(n)$  ab dem sechsten Eingriff, d. h. für  $n \geq 6$ , hin. Hingegen scheinen der Mittelwert von  $b(n)$  wie auch der der Standardabweichung von  $NLinit(n)$  und  $b(n)$  zu divergieren. Dies zeugt von der signifikanten Tendenz der Verschleißrate  $b$ , nach jedem Eingriff zuzunehmen, was letztendlich zum Ende des Lebenszyklus des Schotterbetts führt. Auch die Standardabweichungen von  $NLinit(n)$  und  $b(n)$  neigen zu einem exponentiellen Wachstum, also je größer  $n$ , desto deutlicher stochastisch der

Abbildung 3.6: Geschätzte und eingepasste Standardabweichungen von  $NLinit_n$ Abbildung 3.7: Geschätzte und eingepasste Standardabweichungen von  $b_n$

Verschleiß- und Instandhaltungsprozess und damit umso schwieriger seine Vorhersage. Wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, wird für die Ausgleichsrechnung von  $NLinit(n)$  eine Funktion der Form 3.15 und für  $b(n)$  und die Standardabweichungen Funktionen der Form 3.16 angenommen.

Nach der Kalkulation dieser vier Funktionen ist das Modell vollständig und es können Simulationen ausgeführt werden. Durch Anwendung des o. g. Levenberg-Marquardt Verfahrens werden Werte für die Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\theta$  gefunden und damit die gepunkteten Kurven der Abbildungen 3.4 bis 3.5. Für  $\sigma_\varepsilon$  ist der geschätzte Wert 0,036.

### 3.4.4 Simulierte Prozessrealisierungen

In diesem Abschnitt werden einige auf Basis der in Abschnitt 3.4.3 ermittelten Modellparametrierung gewonnenen Prozessrealisierungen präsentiert und analysiert.

Abb. 3.8 zeigt eine Realisierung des Prozesses, wenn alle Standardabweichungen und die Messunsicherheit auf Null gesetzt werden, wodurch das stochastische Charakteristikum des Prozesses abgeschaltet wird. Überdies wurde die Eingriffsschwelle auf 0,7 gesetzt. Diese Prozessrealisierung kann also als eine Art *Durchschnitt* aller in der Datenbank enthaltenen Realisierungen gelten.

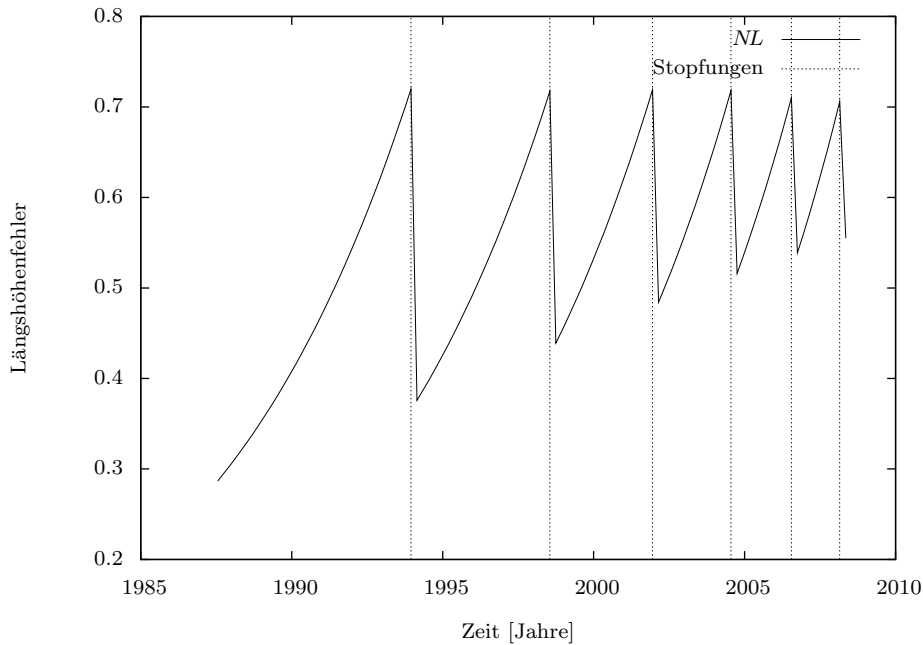


Abbildung 3.8: Deterministische Simulation mit Eingriffsschwelle 0,7

In Abb. 3.9 befinden sich Prozessrealisierungen mit stochastischem Charakteristikum. Die Eingriffsschwellen wurden auf 0,9 bzw. 1,1 gesetzt. Die Simulationen scheinen den

gemessenen Prozess realitätsnah nachzubilden. Die Zeitspanne zwischen zwei nacheinander folgenden Stopfeingriffen wird tendenziell kürzer, jedoch können durchaus Unregelmäßigkeiten vorkommen.

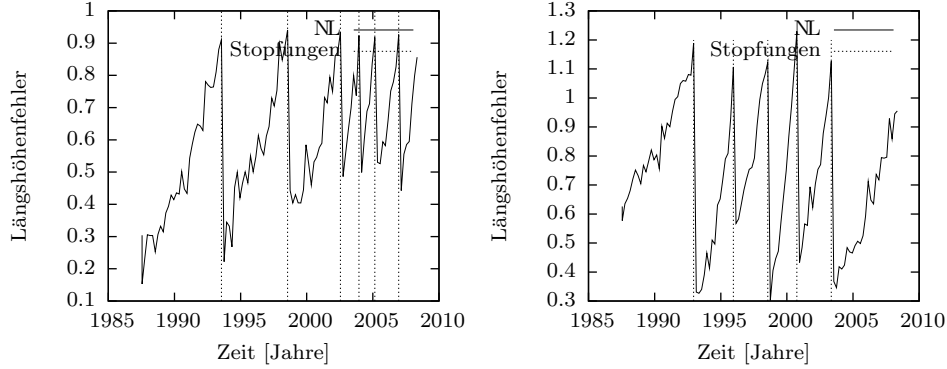


Abbildung 3.9: Stochastische Simulation mit Eingriffsschwellen 0,9 und 1,1

Ein Systemparameter mit signifikantem Einfluss auf die Alterungsgeschwindigkeit der Gleisgeometrie ist die maximale Betriebsgeschwindigkeit  $v$ . Nach [UBALDE et al., 2005] beträgt  $\alpha_v$  auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid-Sevilla 1,27.

Wenn  $v_1 = 300 \text{ km/h}$  und  $v_0 = 250 \text{ km/h}$  dann gilt Gl. 3.33.

$$NL(t|v = 300) \stackrel{3.27}{=} (NL(t|v = 250) - NL(t = t_n|v = 250))\left(\frac{300}{250}\right)^{1,27} + NL(t = t_n|v = 250) \quad (3.33)$$

Abb. 3.10 zeigt eine Realisierung des Prozesses mit den Betriebsgeschwindigkeiten 250 bzw. 300 km/h. Der stochastische Charakter sowohl des Längshöhenfehlers nach einem Stopfeingriff  $NL_{init}$ , als auch der Verschleißrate  $b$  können beobachtet werden. Beide Kurven konvergieren zu den Zeitpunkten wo Eingriffe stattfinden, wonach die Kurve mit  $v = 300 \text{ km/h}$  schneller anwächst.

### 3.5 Modellierung inhomogener Gleisabschnitte

Die Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie auf Sektor-Niveau hätte eine begrenzte Anwendbarkeit, indem die gleichen technischen und menschlichen Ressourcen für die Instandhaltung einer ganzen Strecke oder sogar eines Netzes eingesetzt werden. Die Simulationmethode ist für ihre Anwendung auf langen Strecken, z. B. von über 250 km, konzipiert. Jedoch ist die Alterungsgeschwindigkeit entlang einer ganzen Strecke inhomogen, da sie von verschiedenen Eigenschaften des Gleisbettes abhängig ist. Daher ist es wünschenswert ähnliche Sektoren zu identifizieren, diese in Cluster zu gruppieren und für jeden der Cluster die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Systemidentifikation durchzuführen. Eine solche Clusteranalyse würde zu realitätsnäherer



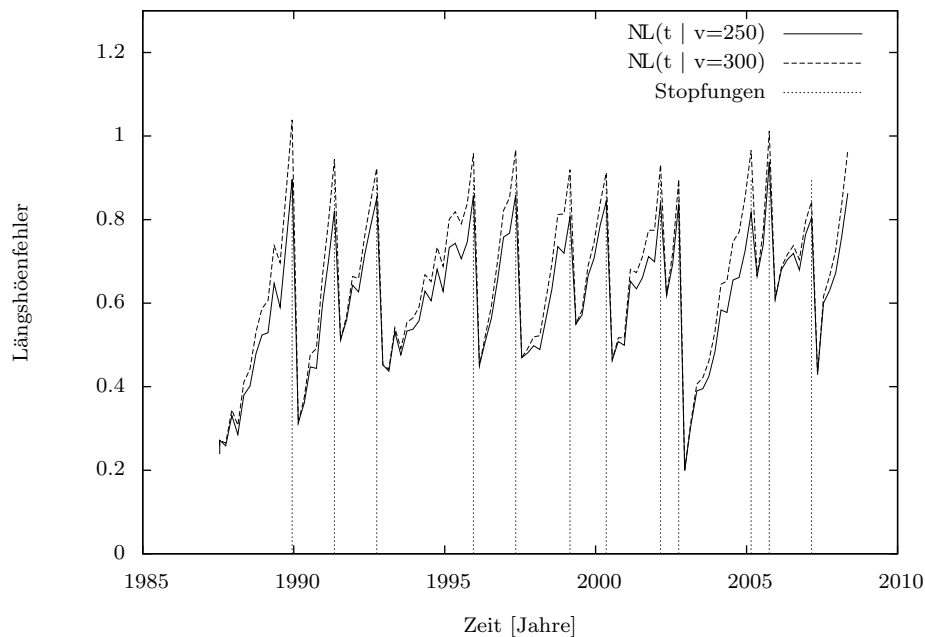


Abbildung 3.10: Prozessrealisierung mit Betriebsgeschwindigkeiten 250 bzw. 300 km/h

Simulationen führen und die Durchführbarkeit einer ganzheitlichen Optimierung des Instandhaltungsprozesses der ganzen Strecke fördern. Die Clusteranalyse könnte wie in [MEIER-HIRMER et al., 2006] auf der Basis von Vorkenntnissen der Gleiseigenschaften jedes Sektors erfolgen. Wenn solche Vorkenntnisse noch nicht vorhanden sind, kann die Clusteranalyse auch auf langjährigen Messreihen basieren. In diesem Fall werden *ähnliche* Messreihen identifiziert und gruppiert, ohne über Kenntnisse in den Ursachen der Ähnlichkeit zu verfügen. In diesem Abschnitt wird ein Verfahren zur Clusteranalyse von Gleisabschnitten basierend auf Messreihen der Gleisgeometriefehler präsentiert. Verschiedene Kriterien zur Ähnlichkeitsmessung bzw. Clustering-Algorithmen werden rezensiert und die für diese Analyse bestgeeigneten ausgewählt. Das Verfahren wird am Beispiel der bereits in Abschnitt 3.4 benutzten Datenbank angewendet.

### 3.5.1 Clusteranalyse

Der Begriff Clusteranalyse bezeichnet „...strukturentdeckende, multivariate Analyseverfahren zur Ermittlung von Gruppen (Clusters) von Objekten, deren Eigenschaften oder Eigenschaftsausprägungen bestimmte Ähnlichkeiten aufweisen...“ [GERARD et al., 2009]. Dank der an verschiedene Anforderungen angepassten Varianten der Clusteranalyse findet sie in den verschiedensten Domänen Anwendung, beispielsweise zur Erkennung von Mustern in der Bildverarbeitung oder beim Data- oder Textmining. Jedem zu clusternden Objekt wird ein Punkt in einem Vektorraum zugeordnet, dessen

Dimensionen die Eigenschaftsausprägungen der Objekte bilden. Jedes Cluster ist also eine Untermenge dieser Objekte, die in Bezug auf eine bestimmte Distanzmessung eine minimale Abstandssumme aufweist. Wie in Abb. 3.11 dargestellt, können Clustering-Algorithmen hierarchisch oder partitionierend sein, wobei erstere noch in agglomerierende oder unterteilende und zweitere in auf Austausch und iterierte Minimaldistanz basierende Algorithmen unterteilt werden können. Weiterhin gibt es überwachte und nicht überwachte Algorithmen. Außerdem gibt es modellbasierte Algorithmen wie z. B. das mixture-of-Gaussians Modell, bei denen eine bestimmte zugrundeliegende Verteilung der Daten angenommen wird. In [BERINGER, 2007] werden die bekanntesten Clustering-Algorithmen rezensiert.

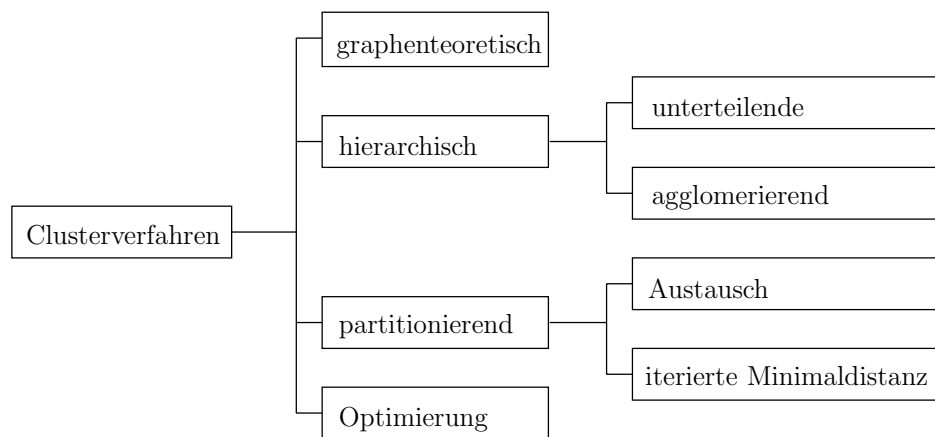


Abbildung 3.11: Hierarchische Zuordnung der Clustering-Algorithmen [WIKIPEDIA, 2011a]

### 3.5.2 Clustering-Algorithmen

In dieser Arbeit werden die zwei bekanntesten Clustering-Algorithmen angewendet und verglichen, um den für das Clustering inhomogener Gleisabschnitte bestgeeigneten zu finden, nämlich:

- k-Means (agglomerierend)
- Hierarchisches Clustern (partitionierend)

Beide Algorithmen sind vom Prinzip her sehr unterschiedlich, da k-Means agglomerierend und das hierarchische Clustern partitionierend ist. Während bei k-Means das Ergebnis von der zufälligen Initialisierung der Clusterzentren abhängt, ist das hierarchische Clustern ein deterministischer Prozess.

### Der k-Means-Algorithmus

Der k-means Algorithmus gehört zu den partitionierenden, auf iterierte Minimaldistanz basierenden Algorithmen. Dabei wird die Anzahl von Clustern  $k$  vor dem Start festgelegt. Eine Funktion zur Berechnung des Abstands zweier Messungen muss gegeben und kompatibel zur Mittelwertbildung sein.

Der Algorithmus kann wie folgt beschrieben werden:

1. *Initialisierung der Clusterzentren.*  $k$  Clusterzentren werden gewürfelt.
2. *Zuordnung der Objekte.* Jedes Objekt wird dem ihm nächsten Clusterzentrum zugeordnet
3. *Neuberechnung der Clusterzentren.* Für jeden Cluster wird das Clusterzentrum neu berechnet
4. *Wiederholung.* Falls sich im Schritt 2 die Zuordnung mindestens eines Objekts geändert hat, weiter mit Schritt 2, sonst Ende

Obwohl k-Means ein effektiver Algorithmus ist, hat er auch Nachteile. Ein k-Means Algorithmus findet garantiert eine Lösung, jedoch gibt er keine Garantie über ihre Qualität. Diese hängt im Wesentlichen von den bei der Initialisierung gewürfelten Clusterzentren ab. Zwecks der Bewältigung dieser Probleme muss das Verfahren mehrmals realisiert werden bis die Varianz der dabei erreichten Cluster einen annehmbaren Wert erreicht [BRADSKY und KAEHLER, 2008]. In dieser Arbeit wird die Clusteranalyse 10.000 mal wiederholt, jeweils mit zufälliger Initialisierung der Clusterzentren. Danach wird das Ergebnis ausgewählt, das  $F_{clustering}$  nach Gl. 3.34, sprich die Summierung der Distanzen zwischen jedem Objekt und seinem Clusterzentrum, minimiert. Wenn dieses Ergebnis mehrere Male gefunden wurde, hat es große Chancen, eben das optimale Clustering zu sein. Wenn es aber nach den 10.000 Durchgänge lediglich ein Mal gefunden wurde, gibt es wahrscheinlich noch bessere Lösungen.

$$F_{clustering} = \sum_{i=1}^{i_{max}} d(x_i, Zentrum(C_i)) \quad (3.34)$$

mit

$F_{clustering}$  : Gesamtsumme der Distanz jedes Objektes zum Zentrum seines Clusters

Im Prinzip setzt k-Means voraus dass die Anzahl der Cluster  $k$  im Voraus bekannt sein muss. Jedoch besteht dadurch eine Möglichkeit für seine Bestimmung,  $k$  sukzessiv zu erhöhen. Dadurch wird die totale Varianz der Daten schnell zurückgehen. Wenn der Rückgang stagniert, ist ein guter Wert für  $k$  erreicht. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 3.5.4 angewandt.

### Der hierarchisches-Clustern-Algorithmus

Bei den anhäufenden (agglomerierenden) Verfahren, die in der Praxis häufiger eingesetzt werden, wird folgendermaßen vorgegangen: Jedes Objekt wird zunächst als eigenes Cluster mit lediglich einem Mitglied (nämlich es selbst) betrachtet. Dann werden sukzessiv die jeweils einander nächsten Cluster zu einem Cluster zusammengefasst, bis für alle Cluster gilt, dass die Distanz zueinander (vgl. Abschnitt 3.5.3 für verschiedene Distanzfunktionen zur Bestimmung des Abstands zweier Cluster) einen vorgegebenen Wert überschreitet oder die Anzahl der Cluster eine vorgegebene Grenze erreicht hat. Aufgrund dieses Vorgehens entsteht bei dem agglomerierenden Verfahren eine Baumstruktur, wie exemplarisch in Abb. 3.12 dargestellt. Die Anfangscluster (mit jeweils nur einem Mitglied) werden von den Baumblättern repräsentiert. Durch die Fusion der einzelnen Cluster entstehen Knoten. Dies kann wiederholt werden, bis ein Cluster alle Objekte beinhaltet. Zudem entspricht die Länge jeder Kante der Distanz zwischen dem ursprünglichen und dem aus der Fusion resultierenden Cluster.

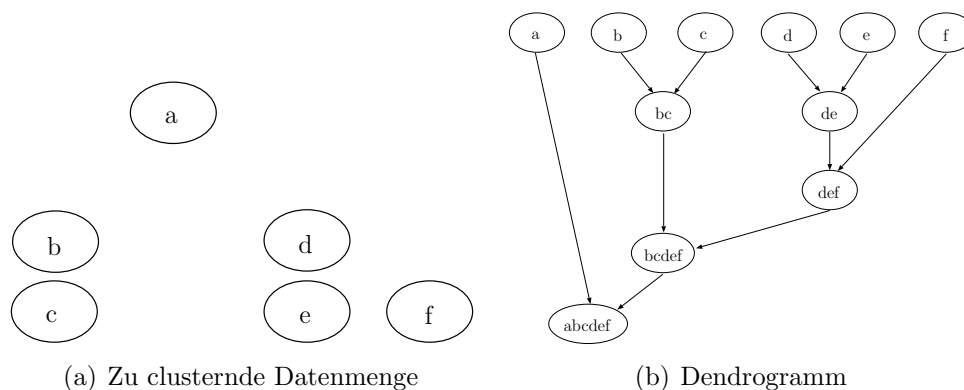


Abbildung 3.12: Die Objekte **b** und **c**, sowie **d** und **e** liegen sehr dicht zusammen, während **f** und **a** sich weiter entfernt davon befinden [WIKIPEDIA, 2011a]

### 3.5.3 Angewendete Clustering Bibliothek

Die Clusteranalyse wird anhand von [DE HOON, 2010], eine Open-Source Bibliothek von Clustering-Algorithmen, implementiert. Diese enthält verschiedene partitionierende wie auch agglomerierende Clustering-Algorithmen, nämlich

- Hierarchisches Clustering (versch. Varianten)
- k-Means
- Selbstorganisierende Karten
- Hauptkomponentenanalyse

wie auch verschiedene Distanzmessungsfunktionen, nämlich

- Person-Korrelationskoeffizient (verschiedene Varianten)
- Spearmans Rangkorrelationskoeffizient (Spearmans  $\rho$ )
- Kendalls  $\tau$
- Euklidische Distanz
- Manhattan oder City-Block Distanz

### 3.5.4 Implementierung

Im Rahmen dieser Arbeit werden der k-Means Algorithmus und der hierarchisches-Clustering-Algorithmus erprobt und verglichen. Für das Messen der Abstände zwischen Objekten oder Clusterzentren wird die euklidische Distanzmessung benutzt, vgl. Gl. 3.36.

In dieser Arbeit wird jeder Gleissektor als zu clusterndes Objekt betrachtet und der Vektorraum  $\mathbf{v}$  wird wie in Gl. 3.35 definiert.

$$\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{20} : v_n = \begin{cases} NLimit_n & \text{if } 0 \leq n \leq 10 \\ b_{n-10} & \text{if } 10 < n < 20 \end{cases} \quad (3.35)$$

Da es für alle Objekte gilt, dass alle 20 Koeffizienten reale Zahlen der gleichen Größenordnung sind (vgl. Abbildungen 3.4 und 3.5), ist eine euklidische Distanzmessung adäquat. Also wird als Distanzmaß der euklidische Abstand wie in Gl. 3.36 definiert und die Clusterzentren  $C_i$  werden als der arithmetische Mittelwert aller Objekte, die dem Cluster  $i$  gehören, wie in Gl. 3.37 definiert.

$$d_{x,y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (3.36)$$

mit

$d(x_i, C_i)$  : Distanz zwischen dem Objekt  $x_i$  und dem Zentrum des Clusters zu dem das Objekt  $x_i$  gehört, vgl. Gl. 3.36

$$Z_{C_i} = \frac{1}{N_{C_i}} \sum_{x \in C_i} x \quad (3.37)$$

mit

$Z_{C_i}$  : Zentrum des Clusters  $i$   
 $N_{C_i}$  : Anzahl der dem Cluster  $i$  zugehörigen Objekte

Ein wesentliches Problem dieser Lösung in Hinsicht auf das Prozessmodell von Abschnitt 3.2.1 ist, dass manche Cluster zu wenige Mitglieder haben, so dass eine statistische Charakterisierung dieser Objekte nach Gleichungen 3.31 und 3.3 unplausibel ist. So ist es z. B. nicht sinnvoll die Standardabweichung  $\sigma_b^2(n)$  zu identifizieren, wenn nur eine Prozessrealisierung vorhanden ist (d. h. das Cluster nur ein Objekt hat). Für die Beseitigung dieses Problems wird ein Minimum von fünf Objekten pro Cluster vorausgesetzt. Also werden alle Cluster, denen weniger als fünf Objekte zugeordnet sind (im Folgenden *Mini-Cluster* genannt), mit dem *nächsten* Cluster, d. h. mit dem Cluster dessen Zentrum dem eigenem Zentrum am nächsten liegt, fusioniert. Nach jeder Clusterfusion reduziert sich die Anzahl der Cluster um eins.

Abb. 3.13 zeigt für jedes  $k \in 1 \dots k_{max}$  wo  $k_{max}$  der Anzahl der Objekte (d. h. Sektoren) entspricht den jeweils erreichten Gesamtfehler  $F_{Clustering}$  nach Gl. 3.34 mit hierarchischem Clustering (Abb. 3.13(a)) und k-Means (Abb. 3.13(b)). Die durchgezogenen und gestrichelten Linien zeigen den Fehler vor bzw. nach der Entfernung der Mini-Cluster.

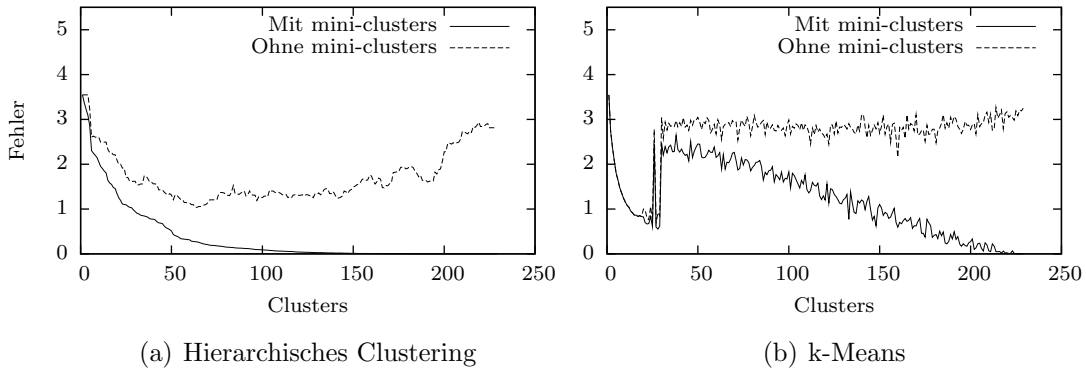


Abbildung 3.13: Fehler als Funktion der Anzahl der Cluster mit hierarchischem Clustering (3.13(a)) und k-Means Clustering (3.13(b)), mit Mini-Cluster (durchgezogene Linien) und ohne (gestrichelte Linien)

Der hierarchische Algorithmus findet bessere oder zumindest gleichwertige Lösungen, wenn die Anzahl der Cluster  $k$  steigt. Deshalb geht die durchgezogene Linie stets zurück. Wenn die Anzahl der Cluster steigt, führt die Entfernung der Mini-Cluster zu immer höheren zusätzlichen Fehlern, weshalb die gestrichelte Linie nur bis  $k = 60$  tendenziell zurückgeht und danach anwächst. Der minimale Fehler ohne Mini-Cluster wird mit  $k = 64$  erreicht und beträgt  $F_{clustering} = 1,03828$ .

Im Falle des k-Means Algorithmus ist der Verlauf des Fehlers aufgrund seines stochastischen Charakteristikums unregelmäßiger (vgl. Abb. 3.13(b)). Im Bereich  $k = 1 \dots 25$  geht  $F_{clustering}$  schnell zurück. Bemerkenswert ist dabei, dass bis  $k = 16$  der Fehler mit und ohne Mini-Cluster gleich ist. Das bedeutet dass bereits in der Lösung mit Mini-Clustern allerdings keine Mini-Cluster vorhanden sind, d. h. jedem Cluster fünf oder mehr Sektoren zugeordnet sind. Bei  $k = 28$  springen beide Kurven um 200% ihres Wertes. Für  $29 < k < 250$  wird der Unterschied zwischen dem Fehler mit und ohne

Mini-Cluster stets größer. Abb. 3.14 zeigt ein Detail von Abb. 3.13(b). Daraus geht hervor dass der minimale Fehler ohne Mini-Cluster mit  $k = 25$  erreicht wird, er beträgt  $F_{clustering} = 0,612$ . Die beste Lösung ohne Mini-Cluster wird also mit dem k-Means Algorithmus und  $k = 25$  erreicht.

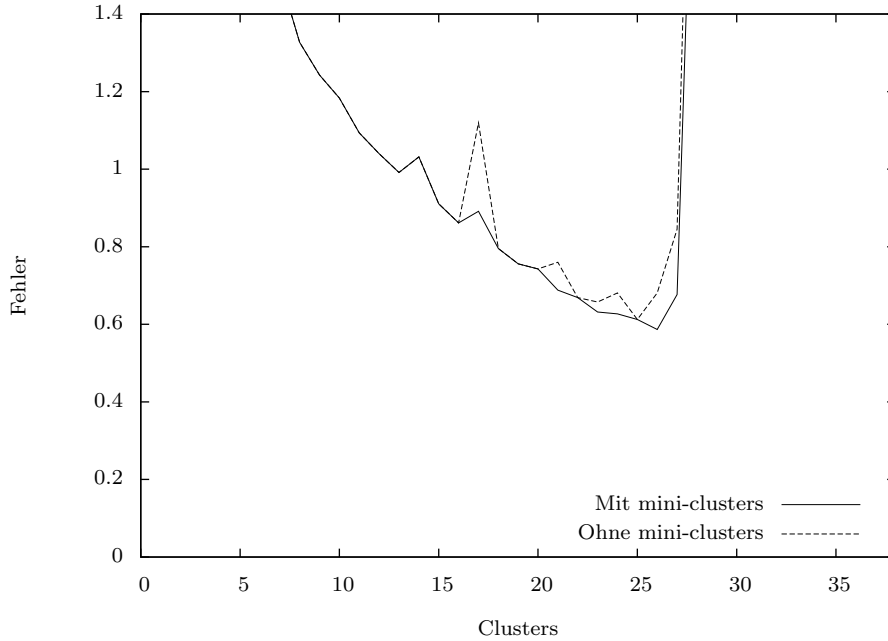


Abbildung 3.14: Detail der Abb. 3.13(b). Das beste Cluster-Fehler Verhältnis wird für  $k = 25$  erreicht

## 3.6 Ausblick

In diesem Kapitel wurde eine Modellierungs- und Simulationsmethode des Verschleiß- und Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie eingeführt. Dabei werden sowohl die exponentielle Wachstumsrate als auch der durch einen Stopfeingriff erreichbare Längshöhenfehler  $NLimit$  als lognormal verteilte stochastische Variablen modelliert, dessen Merkmale, d. h. Mittelwert und Varianz, von der Anzahl der seit der letzten Erneuerung akkumulierten Eingriffe abhängen. Die Gültigkeit dieser Annahmen wird in der Fallstudie von Abschnitt 3.4 verifiziert. Darüber hinaus werden die Setzung von  $NLimit(n)$  bis zum fünften Stopfeingriff (d. h. bis  $n = 5$ ) wie das exponentielle Wachstum von  $b(n)$ , bestätigt.

Zudem wird ein Verfahren zur Clusteranalyse von Gleisabschnitten vorgestellt, anhand dessen die Modellierungsmethode auch auf inhomogene Gleisabschnitte angewendet werden kann.

Anhand der vorgestellten Methode können Monte Carlo Prozesssimulationen durchgeführt werden. Im Kapitel 5 wird dieses Simulationsverfahren für die Optimierung von Instandhaltungsstrategien angewendet. In diesem Rahmen sind Simulationen für die Bestimmung der Einflüsse der stochastischen Merkmale des Prozesses auf den Instandhaltungsbedarf und letztendlich auf die Gleisnutzungsdauer nützlich.

Neben der Anwendung, die anhand der Methode im Rahmen dieser Arbeit herausgearbeitet werden, stellen die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse darüber hinaus einen substanziellen Beitrag zum Verständnis des Verschleiß- und Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie dar.



## Kapitel 4

# Prognostizierung des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses des Gleisgeometriezustands

### 4.1 Einleitung

Eine glaubwürdige Vorhersage bezüglich des Alterungsprozesses der Gleisgeometrie ist für die optimale Planung der Instandhaltungsaufgaben unabdingbar. Aus diesem Grund hat der französische Eisenbahnbetreiber SNCF seit seiner Inbetriebnahme, also seit mehr als 20 Jahren, die wesentlichen geometrischen Merkmale seines Hochgeschwindigkeitsnetzes vermessen.

In diesem Kapitel wird ein Prognoseverfahren auf Basis eines hybriden Alterungs- und Instandsetzungsprozessmodells dargestellt, mit dem Ziel, derartige Vorhersagen zu treffen. Das Verfahren nutzt einen *Grey-Box* Ansatz: Es werden eine Modellstruktur und deren Nebenbedingungen spezifiziert, wobei auf Vorkenntnisse hinsichtlich des Prozesses zurückgegriffen wird, um diese ausfindig zu machen. Danach werden Parameterwerte gesucht, die am besten zu den gemessenen Messreihen passen. In Anbetracht der Nichtlinearität des Prozesses, werden die Parameter mittels des Levenberg-Marquart(LM)-Algorithmus, eines iterativen Verfahrens, welches das lokale Minimum einer Funktion als Summe der Quadrate nichtlinearer Funktionen ermittelt, gesucht. Abschließend wird die Methode auf die realen Daten einer französischen TGV-Hochgeschwindigkeitsstrecke angewendet und ihre Ergebnisse werden mit denen anderer aus der Literatur bezogenen Prognosemethoden verglichen.

### 4.2 Problemdefinition

Die Gleisgeometrie wird in periodischen Abständen mit mechanischen bzw. elektrischen Sensoren durch spezielle messtechnische Mittel ausgemessen (vgl. Abschnitt 2.2). Diese Messdaten werden anschließend genutzt, um die Parameter der *grey box* Modelle zu

identifizieren, d. h. Modelle mit einer bestimmten Struktur, aber einer Reihe variabler Parameter (vgl. Abschnitt 4.3), deren Werte anhand eines Optimierungsprozesses ermittelt werden. Die Qualität der mit den unterschiedlichen Modellen erzeugten Prognosen wird daraufhin verglichen und das adäquateste Modelle ausgewählt. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Übersicht über den hiermit beschriebenen Auswahlprozess des Vorhersagemodells.

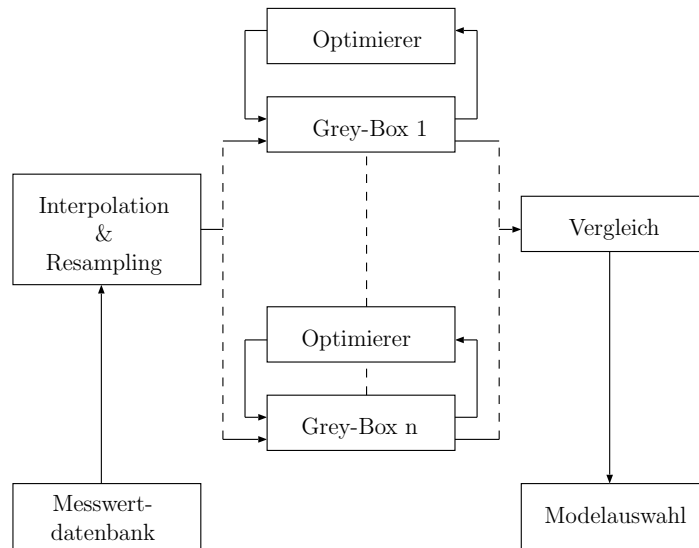


Abbildung 4.1: Schematische Übersicht der Prognosemodellauswahl

## 4.3 Angewendete Modelle

In diesem Abschnitt werden die implementierten *Grey-Box* Modelle beschrieben. Der gleisgeometrische Qualitätsverlauf wird gemäß zweier Unterprozesse betrachtet: Alterung und Instandsetzung. Verschiedene Modelle werden für jeden der beiden Prozesse vorgeschlagen und dann in *Grey-Box* Modellen zusammengefügt.

### 4.3.1 Instandsetzungsmodell

Im Gegensatz zum Verschleißprozess sind Instandsetzungsprozessmodelle nicht zahlreich. In dieser Arbeit wird das nichtlineare Modell von [MIWA et al., 2000] in Betracht bezogen, welches in Gl. (4.1) beschrieben wird.

$$NL_{t+1} - NL_t = \beta_0 \cdot NL_t + \beta_1 \quad (4.1)$$

Um dieses Modell auf reale Fälle anwenden zu können, in denen Streckenabschnitte manchmal nur zum Teil instand gesetzt werden, d. h. Stopfarbeiten haben nur in einem Teil des betrachteten Abschnitts stattfinden, wird Gl. 4.2 als ein Signal mit dem Wert

0 definiert, wenn keine Stopfung stattfindet und mit einem Wert, je nach Größe des gestopften Abschnittsanteils, zwischen 0 und 1, wenn eine Stopfung in dem Abschnitt stattfindet.

$$u_t = \frac{\text{Länge des gestopften Abschnitts zur Zeit } t}{\text{Gesamtabschnittlänge}} \quad (4.2)$$

Also wird Gleichung (4.3) genutzt, um die Auswirkung eines Stopfeingriffs auf  $NL$  vorherzusagen.

$$NL_{t+1} = \beta_0 \cdot NL_t \cdot u_t + \beta_1 \cdot u_t + NL_t \quad (4.3)$$

### 4.3.2 Alterungsmodelle

Der Verschleißprozess der Gleisgeometrie wurde in den letzten 30 Jahren intensiv erforscht. Nach [SADEGHI und ASKARINEJAD, 2010] gibt es zwei wesentliche Arten von Ansätzen: den technischen und den statistischen Ansatz. Der technische Ansatz zielt darauf ab, die mechanischen Eigenschaften des Schienenverschleißes zu berücksichtigen, wobei er verständlich macht, inwieweit die Schiene auf Beladung des Vehikels reagiert. Grundsätzlich ist sich die technische Literatur darüber einig, dass der Verschleiß von der Verkehrsintensität, der Fahrgeschwindigkeit und dem Achsgewicht abhängt. Die meisten Quellen sind bestrebt, die Verschleißrate als eine Funktion dieser drei Variablen darzustellen. Für einen Überblick über die verschiedenen Formeln s. [UBALDE et al., 2005]. Der statistische Ansatz hingegen versucht die Zeitreihen der Messwerte des Gleisgeometriefehlers zu analysieren. Letztere wird dann als abhängige Variable betrachtet und erklärende Variablen können z. B. die Achslast oder schlichtweg die Zeit sein. Ziel dieser Arbeit ist es nicht, Verschleiß als eine Funktion bekannter Variablen zu definieren, sondern Verschleiß für Zeitintervalle vorherzusagen, wobei angenommen wird, dass alle anderen den Verschleiß beeinflussenden Variablen unverändert bleiben. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf den statistischen Ansatz. Betrachtet werden vier verschiedene Modelle: die exponentielle Glättung zweiten Grades, das polynomische Modell, das autoregressive Modell und das hier eingeführte hybride Modell. In Abschnitt 4.4 wird eine Analyse ihrer Leistungsfähigkeit durchgeführt.

### 4.3.3 Exponentielle Glättung

In [MIWA et al., 2000] wird die exponentielle Glättung zweiter Ordnung für das Verschleißmodell der Gleisgeometrie aufgestellt. Exponentielle Glättung wird weitläufig genutzt, um Zeitabläufe auf dem Gebiet der Ökonometrie vorherzusagen und wurde von [BROWN, 1962] entwickelt. Die exponentielle Glättung zweiter Ordnung basiert auf der Annahme eines nur lokal konstanten linearen Modells erster Ordnung, d. h. ein lokal konstanter linearer Verlauf, indem sie jüngeren Beobachten mehr Bedeutung beimisst. Zum Zeitpunkt  $n$  werden die Parameter  $\beta_{0,n}$  und  $\beta_{1,n}$  durch Minimierung der Fehlerfunktion  $f(\beta_{0,n} + \beta_{1,n})$  bezogen, vgl. Gl (4.4).

$$f(\beta_{0,n} + \beta_{1,n}) = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^j [Z_{n-j} - (\beta_{0,n} + \beta_{1,n} j)]^2 \rightarrow \min \quad (4.4)$$

Die Konstante  $\omega$  ( $\omega < 1$ ) ist ein Glättungsfaktor, der mit den jüngsten Beobachtungen exponentiell abfällt. Zum Zeitpunkt  $n$  wird die Prognose für den Zeitpunkt  $n+l$  mittels Gl. (4.5) herangezogen.

$$\hat{Z}(n+l) = \hat{\beta}_{0,n} + \hat{\beta}_{1,n} l \quad (4.5)$$

Um für dieses Modell auch sinnvoll die Effekte von Verschleiß und Instandsetzung zu erläutern, ist es notwendig, die Modelle, die durch die Gleichungen (4.1) und (4.5) ausgedrückt werden, zu kombinieren. Abb. 4.2 zeigt diese Kombination.

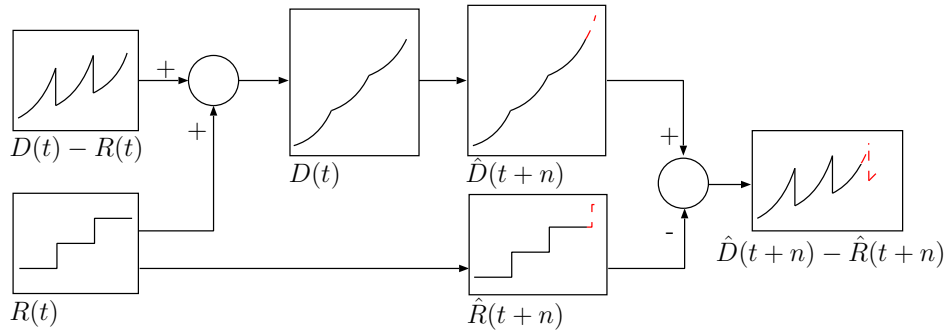


Abbildung 4.2: Prozedur für die Entkopplung von Verschleiß und Instandsetzung für die Prognoseerstellung durch exponentielle Glättung

Aus der Summierung der aus der Stopfung resultierenden Sprünge  $R(t)$  und des originalen Gleisgeometrieverlaufs  $D(t) + R(t)$  resultiert ein neues Signal  $D(t)$ , welches nur für den Alterungsprozess steht. Wird Gl. 4.3 auf das Instandsetzungssignal (hier wird vorausgesetzt, dass die Zeitpunkte künftiger Stopfungen bekannt sind) bzw. Gl. 4.5 auf das Verschleißsignal angewendet, werden Vorhersagen  $\hat{R}(t)$  und  $\hat{D}(t)$  für beide Prozesse gewonnen. Wenn abschließend beide Signale erneut kombiniert werden, wird eine Vorhersage des kombinierten Prozesses  $\hat{R}(t) - \hat{D}(t)$  gewonnen.

#### 4.3.4 Polynomisches Modell

In [JOVANOVIĆ, 2004] wird ein „...generisches, universelles Verschleißmodell...“ der Gleisgeometrie vorgestellt. Bei diesem Modell wird die Annahme getroffen, dass das Verschleißmodell die Summe parallel laufender Prozesse ist. Instandsetzungseingriffe setzen einen oder mehrere dieser Prozesse zurück. In dieser Arbeit werden zwei parallele Verschleißprozesse betrachtet: Der eine steht für den Verschleiß, der nicht durch Stopfeingriffe korrigiert werden kann, sondern nur durch Erneuerung des Schotters. Der andere steht für Verschleiß, der effektiv durch Stopfung korrigiert werden kann. In

Bezug auf dieses Modell kann der Verlauf von  $NL$  durch Gl. 4.6 ausgedrückt werden, wobei  $t_{slt}$  die seit dem letzten Stopfeingriff verstrichene Zeit ist und  $\alpha_1$  bis  $\alpha_4$  Parameter sind, für die geeignete Werte gefunden werden müssen. Dieses Modell berücksichtigt sowohl den Verschleiß als auch die Instandsetzung.

$$NL(t, t_{slt}) = \alpha_1 + \alpha_2 t + \alpha_3 t_{slt} + \alpha_4 t_{slt}^2 \quad (4.6)$$

### 4.3.5 Autoregressives Modell

Bei [HAMID und GROSS, 1981] wird die Verwendung von ARMA (*AutoRegressive Moving Average*) Modellen für den Verschleiß der Gleisgeometrie vorgeschlagen. Um dieses Modell anzuwenden, wird  $NL_t$  als diskretes Signal betrachtet, das in regelmäßigen Intervallen abgetastet wird. Weiterhin wird Gl. 4.7 als kumulierte Stopfungseingriffe definiert.

$$U_t = \sum_{n=0}^t u_t \quad (4.7)$$

Dann kann das in dieser Arbeit verwendete ARIMA Modell als Gl. 4.8 definiert werden.

$$NL_t = \alpha_1 NL_{t-1} + \alpha_2 NL_{t-2} + \alpha_3 U_{t-1} + \alpha_4 U_{t-2} + \alpha_5 U_t NL_{t-1} + \alpha_6 \quad (4.8)$$

Dies ist ein AR Modell zweiter Ordnung inklusive des nichtlinearen Instandsetzungsmodells von Gl. 4.3.

### 4.3.6 Hybrides Modell

In Anbetracht

- der Kurven des Verschleißes der Gleisgeometrie wie beispielsweise in Abb. 3.1 und
- der Ausführungen der in Abschnitte 4.3.3, 4.3.4 und 4.3.5 vorgestellten Vorhersagemodelle

können folgende Anmerkungen formuliert werden:

- Der Gradient der Kurve (Verschleißgeschwindigkeit) zwischen zwei Stopfeingriffen bleibt konstant bzw. lokal konstant.
- Der Kurvengradient verändert sich häufig abrupt nach der Stopfarbeit.
- Die bisher gezeigten Vorhersagemodelle scheinen die ersten Jahre zufriedenstellend zu arbeiten, werden aber nach einigen Eingriffen ungeeignet.
- Nach der Stopfung kann das Verhalten der Gleisgeometrie aufgrund der Anfangssetzung stark nichtlinear sein [LICHTBERGER, 2010, S. 463]

[LUNZE, 2002] argumentiert damit, dass „...Zustandssprünge ein grundlegendes hybrides Phänomen sind und können weder durch Methoden kontinuierlicher oder diskreter Systemtheorien repräsentiert oder analysiert werden...“. Nach dieser Aussage wird die Annahme eines hybriden Modells getroffen, wobei die Auswirkung der Durchführung von Stopfarbeiten auf das Prozessmerkmal  $NL$  als Stufensprünge betrachtet werden. Für die Prognoseerstellung wird eine exponentielle Glättung zweiter Ordnung verwendet, also werden die Prognosen anhand von Gl. 4.5 ermittelt. Jedoch im Gegensatz zu dem Modell, das in Abschnitt 4.3.5 dargestellt wurde, werden die Parameter nach jedem Stopfeingriff neu identifiziert. Dies führt zu einem Modell, das sich selbst sehr schnell nach jeder Stopfung, jedoch sehr langsam zwischen den Stopfungen adaptiert. Das hybride Prozessmodell unterscheidet drei verschiedene Systemzustände und bei jedem dieser Zustände wird für die Prognoseerstellung die passende Parametrierung angewendet. Im Folgenden werden die Zustände und die jeweiligen Parametrierungen erläutert.

**Initialzustand.** Es wurde nach der letzten Erneuerung noch keine Stopfung durchgeführt und die seit der Erneuerung verlaufene Zeit ist noch kürzer als die Setzungszeit; oder die Anzahl der seit dem Setzungsende gesammelten Messpunkte ist noch nicht ausreichend, um die Parameter  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  zu berechnen. In diesem Zustand wird ein typischer Wert für  $\hat{\beta}_{1,n} = \text{INIT\_}\beta_1$  angenommen und  $\hat{\beta}_{0,n}$  so bestimmt, dass die für die Prognoseerstellung eingesetzte Gerade  $\hat{Z}(t_n)$  (vgl. Gl. 4.5) den letzten verfügbaren Messwert  $m_n$  beinhaltet.

**Setzungszustand.** Es wurde nach der letzten Erneuerung mindestens eine Stopfung durchgeführt, aber die seit der letzten Stopfung verlaufene Zeit ist noch kürzer als die Setzungszeit; oder die Anzahl der seit dem Setzungsende gesammelten Messpunkte ist noch nicht ausreichend, um die Parameter  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  zu berechnen. In diesem Zustand wird der bisherige Wert für  $\hat{\beta}_{1,n}$  beibehalten und, wie im Initialzustand,  $\hat{\beta}_{0,n}$  so bestimmt, dass die für die Prognoseerstellung eingesetzte Gerade  $\hat{Z}(t_n)$  (vgl. Gl. 4.5) den letzten verfügbaren Messwert  $m_n$  beinhaltet.

**Normalzustand.** Die Anzahl der seit dem Setzungsende gesammelten Messpunkte genügt, um die Parameter  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  zu berechnen. In diesem Zustand werden  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  auf der Basis dieser Messpunkte mittels exponentieller Glättung zweiter Ordnung, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, ermittelt.

Nachdem die dem aktuellen Zustand entsprechende Parametrierung erfolgt ist, kann die Prognose anhand von Gl. 4.5 ermittelt werden. Der letzte Schritt der Prognoseerstellung ist die Subtraktion des erwarteten Stopfeffekts, falls bis zur Zeit der Prognose  $n + l$  ein Stopfeingriff geplant ist. Es handelt sich hierbei um einen Stufensprung. Falls nur ein Teil des betrachteten Sektors gestopft wird, ist der Effekt proportional zum gestopften Sektoranteil.

Der Algorithmus für die Ermittlung der  $l$ -Stufe-Vorhersage zum Zeitpunkt  $n$  kann wie folgt beschrieben werden:

1. **Definitionen.** Sei  $M = m_0, \dots, m_n$  die Menge aller verfügbaren Messungen seit der letzten Stopfarbeit und  $T = t_0, \dots, t_n$  seien ihre dazugehörigen Zeiten, wobei die Messungen, die zu dicht an den letzten Stopfarbeit liegen, ausgeschlossen werden. Dies bedeutet, dass alle Messwerte  $m_i : t_i - t_{nt} < \text{SETTLING\_TIME}$  ausgeschlossen werden, wobei  $m_i$  ein Messwert ist,  $t_i$  seine dazugehörige Zeit und  $t_{nt}$  die Zeit des letzten Stopfeingriffs ist, der vor  $t_i$  stattgefunden hat.
2. **Zustandsidentifikation.** Wenn  $\text{Größe}(M) > \text{MIN\_CYCLE\_SIZE}$  dann  $Z = \text{Normal}$ , sonst, wenn der aktuelle Stopfzyklus nicht der erste ist, dann  $Z = \text{Setzung}$ , sonst  $Z = \text{Initial}$ .
3. **Parametrierung.** Parametrierung der Prognoseerstellungsfunktion dem identifizierten Zustand entsprechend.
  - Wenn  $Z = \text{Initial}$ , dann setze  $\hat{\beta}_{1,n} = \text{INIT\_}\beta_1$  und  $\hat{\beta}_{0,n}$ , sodass  $m_n = \hat{\beta}_{0,n} + \hat{\beta}_{1,n}t_n$  gilt.
  - Wenn  $Z = \text{Normal}$ , dann exponentielle Glättung zweiter Ordnung verwenden mit dem Glättungsfaktor OMEGA, um die Abschätzungen  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  zu finden und zu Schritt 4.3.6 gehen.
  - Wenn  $Z = \text{Setzung}$ , dann die Abschätzung von  $\hat{\beta}_{1,n}$  vom vorherigen Stopfzyklus nehmen und  $\hat{\beta}_{0,n}$  sodass  $m_i = \hat{\beta}_{0,n} + \hat{\beta}_{1,n}t_n$  gilt, wobei  $m_n$  der zuletzt gemessene Wert und  $t_n$  die dazugehörige Zeit ist.
4. **Prognoseerstellung.** Ermittle  $\hat{Z}(n+l) = \hat{\beta}_{0,n} + \hat{\beta}_{1,n}l$  als Vorhersage für  $l$  Schritte.
5. **Prognosejustierung.** Wenn eine Stopfarbeit innerhalb der nächsten  $l$  Schritte geplant ist, sprich bei Schritt  $n+k$ , mit  $k < l$ , dann die Vorhersage  $\hat{Z}(n+l)$  durch Subtraktion des erwarteten Stopfeffekts, d. h.  $\Delta NL = (\hat{Z}(n+k) - \text{NL\_AFTER\_TAMPING})u_t$ , aktualisieren.

Der Algorithmus nutzt eine Reihe von Parametern, für die eine Erläuterung folgt.

**SETTLING\_TIME.** Nach der Gleiserneuerung bzw. nach einer Stopfung findet eine Setzungsperiode statt [LICHTBERGER, 2010, S. 463]. Deshalb werden Messungen, die innerhalb der ersten zwei Monate nach einer Stopfarbeit stattfinden, verworfen, d. h. SETTLING\_TIME wird auf zwei Monate gesetzt.

**MIN\_CYCLE\_SIZE.** In der Absicht eine lineare Regression mit einer begründbaren Vertraulichkeit auszuführen, ist eine minimale Anzahl abgetasteter Werte erforderlich. In diesem Fall wird  $\text{MIN\_CYCLE\_SIZE} = 5$  gewählt.

**OMEGA.** Wie in Abschnitt 4.3.3 angemerkt nutzt die exponentielle Glättung zweiter Ordnung die Glättungskonstante  $\omega$ , um den jüngsten Beobachtungen mehr Bedeutung beizumessen. [BROWN, 1962] schlägt die Verwendung von  $\omega = 0,84 < \omega < 0,97$  vor. In dieser Arbeit wird  $\omega = 0,95$  gewählt.

**INIT\_ $\beta_0$  und INIT\_ $\beta_1$ .** Wenn weniger als MIN\_CYCLE\_SIZE Messungen seit der letzten Stopfung gemacht wurden, wird der Parameter  $\hat{\beta}_{1,n}$  von dem letzten Stopfzyklus übernommen (bezeichnet wird mit Stopfzyklus die Zeit zwischen aufeinander folgenden Stopfungen) und  $\hat{\beta}_{0,n}$  wird so gewählt, dass die durch  $\hat{\beta}_{0,n}$  und  $\hat{\beta}_{1,n}$  bestimmte Kurve die letzte Messung enthält. Allerdings, wenn der laufende Stopfzyklus der erste ist, bleibt als einzige Option einen vorgegebenen Initialwert zu wählen. In die Arbeit wird INIT\_ $\beta_1=0,05$  verwendet, d. h. eine initiale Verschleißrate von 0,05 mm pro Jahr.

**NL\_AFTER\_TAMPING.** Dies ist der typische Wert von  $NL$  nach der Stopfung eines kompletten Sektors. In dieser Arbeit ist der Wert als 0,35 gesetzt. Das könnte unter Anwendung des in Abschnitt 3.2 eingeführten Alterungsmodells, wonach der Wert von  $NL$  nach einer Stopfung eine Funktion der kumulierten Anzahl von Stopfungen ist, verbessert werden.

## 4.4 Fallstudie

In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 4.2 eingeführten Modelle auf reale Messdaten einer Hochgeschwindigkeits-TGV-Strecke angewendet. Alle Vorhersagen werden rekursiv getroffen, d. h. die Vorhersagen von  $NL_{t+l}$  werden mit Informationen aus den Zeitperioden  $1, 2, \dots, t$  beschafft. Für die Vorhersage von  $NL_{t+l}$  wurden die Modellparameter abgeschätzt, indem die Messdaten  $NL_1, NL_2, \dots, NL_t$  genutzt wurden. In allen Modellen wurden die Parameter durch Minimierung der Summen der quadratischen Fehler der  $l$ -step Vorhersage abgeschätzt.

Da ein nichtlineares Instandsetzungsmodell (vgl. Abschnitt 4.3.1) genutzt wird, wird die Implementierung des Levenberg-Marquardt Algorithmus [LOURAKIS, 2004] für die Lösung dieser Minimierungsprobleme genutzt. Der Levenberg-Marquardt Algorithmus ist ein iteratives Verfahren, welches das lokale Minimum einer Funktion, die durch die Summe der Quadrate nichtlinearer Funktionen ausgedrückt wird, findet [MARQUARDT, 1963].

Abbildungen 4.3 bis 4.6 zeigen real gemessene Werte eines Gleisabschnitts von 1 km und die ein-Jahr-Vorhersagen für die vier Modelle, die in Abschnitt 4.3.2 vorgestellt wurden. Abb. 4.3 zeigt die Vorhersagen unter Verwendung des AR Modells. Generell steigen Vorhersagefehler nach jeder Stopfung abrupt an und nach einer Dauer von einem bis vier Jahren, nähern sie sich wieder den gemessenen Werten an. Im Falle der exponentiellen Glättung (s. Abb. 4.4) ist das Verhalten ähnlich, indem der Fehler nach der Stopfung wächst, aber die Vorhersage viel schneller zutrifft, so dass der durchschnittliche Fehler signifikant geringer ist. Das polynomische Modell aus Abb. 4.5 scheint dabei



zu scheitern, das Charakteristikum des Verschleiß- und Instandsetzungsprozesses widerzuspiegeln, weshalb seine Leistungsfähigkeit sehr schwach ist. Abschließend zeigt das hybride Modell ein verbessertes Verhalten im ersten Jahr nach jeder Stopfung und danach sind seine Vorhersagen denen des exponentiellen Glättungs-Modells sehr ähnlich.

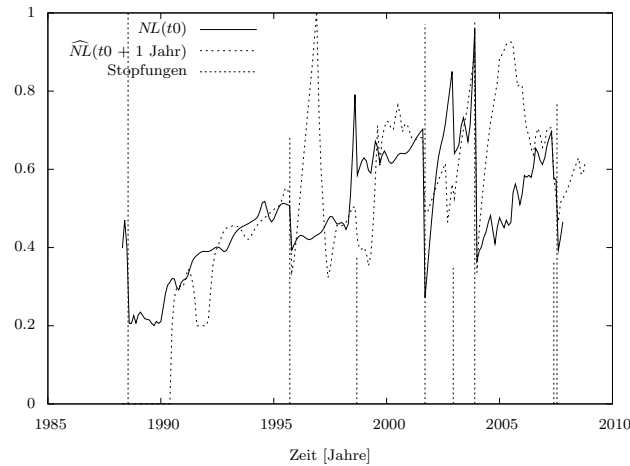


Abbildung 4.3: Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem ARMA-Modell

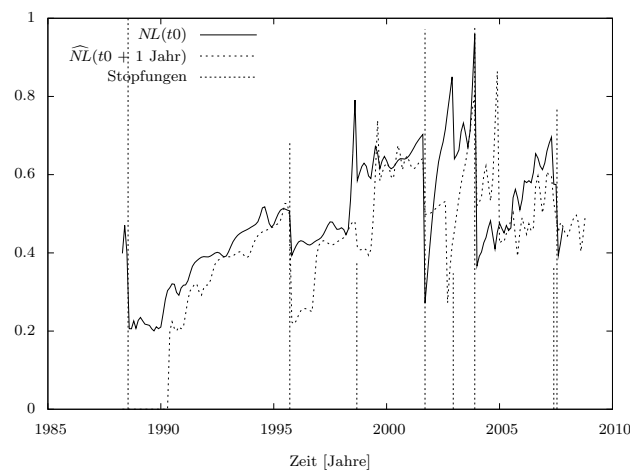


Abbildung 4.4: Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem exponentiellen Glättungsmodell

Abb. 4.7 vergleicht das Fehlersignal für die beiden Modelle mit der besten Vorhersageleistung auf diesem Gleisabschnitt, namentlich das exponentielle Glättungsmodell und

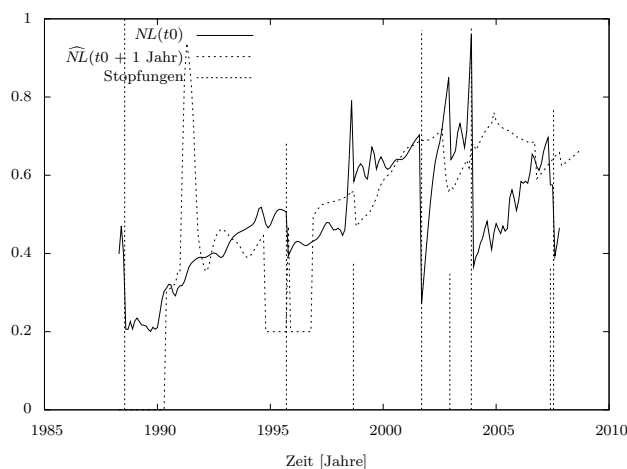


Abbildung 4.5: Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem polynomischen Modell

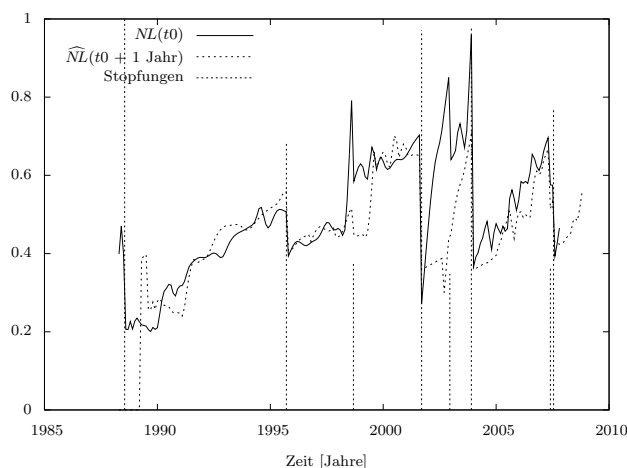


Abbildung 4.6: Messwerte, Stopfeingriffe und Vorhersagen mit einjährigem Prognose-Horizont mit dem hybriden Modell

das hybride Modell. Die Zeitpunkte, zu denen Stopfeingriffe stattfinden, sind wie in Abbildungen 4.3 bis 4.6 mit vertikalen Strichlinien vermerkt. Hier wird offensichtlich, dass die Höchstpunkte der Prognosefehler bedeutend kleiner beim hybriden Systemmodell sind, während in den Bereichen, in denen der absolute Fehler unter 0,1 liegt, sich beide Modelle ähnlich verhalten.

Die Abbildungen 4.3 bis 4.6 sollen einen Eindruck vom Potenzial jeder der vorgestellten Methoden vermitteln. Allerdings können Verschleiß und Instandsetzung der Gleisgeometrie sich von Sektor zu Sektor stark voneinander unterscheiden. Zwecks der Un-

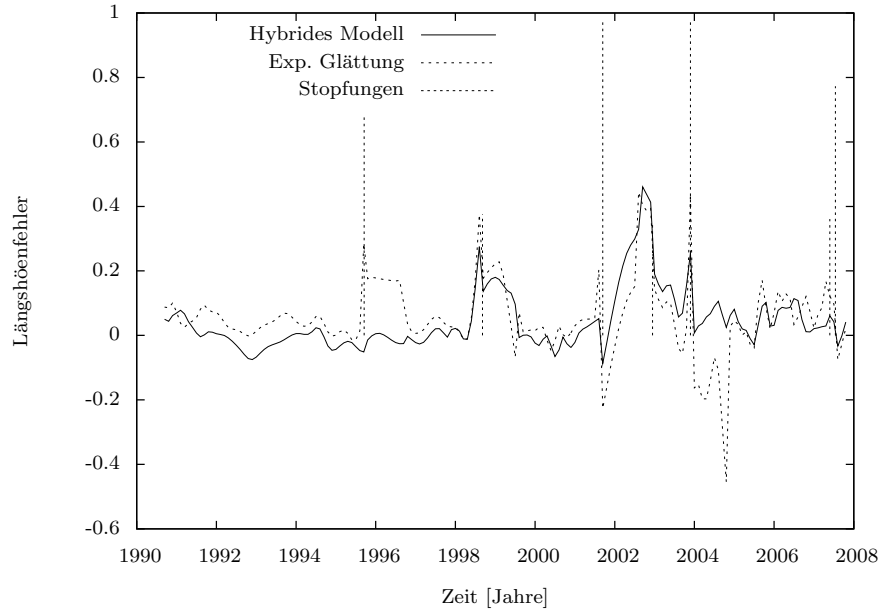


Abbildung 4.7: Vergleich der mit dem hybriden Modell und dem exponentiellen Glättungsmodell erreichten Prognosefehler

tersuchung des Vorhersagepotentials und der Robustheit aller vier Methoden, werden diese auf realen Daten von 200 Sektoren mit einer Länge von jeweils 1 km eingesetzt. Für jedes Modell und jeden Sektor werden die mittleren absoluten prozentualen Fehler (*mean absolute percentage error*, MAPE) und die mittleren quadratischen Fehler (*mean square error*, MSE) erfasst, wie sie in Gl. 4.9 definiert werden.

$$MAPE_i = \frac{1}{N_i} \sum_{n=0}^{N_i-1} \left| \frac{NL_{it} - \widehat{NL}_{it}}{NL_{it}} \right| \quad \text{und} \quad MSE_i = \frac{1}{N_i} \sum_{n=0}^{N_i-1} (NL_{it} - \widehat{NL}_{it})^2 \quad (4.9)$$

$NL_{it}$  : Messwert auf Sektor  $i$  zum Zeitpunkt  $t$

$\widehat{NL}_{it}$  : Einjähriges Prognose von  $NL_{it}$

$N_i$  : Anzahl der Abtastungen die für den Sektor  $i$  verfügbar sind.

In Tabelle 4.1 wird der Erwartungswert und die Varianz sowohl für MAPE als auch MSE für alle vorgestellten Methoden dargestellt, inklusive der naiven Vorhersage  $\widehat{NL}_{t+l} = NL_t$ . Die Mittelwerte und Varianzen berechnen sich wie in Gl. 4.10, wobei  $X$  für MAPE und MSE steht.

$$\hat{\mu}(X) = \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} X_i \quad \text{und} \quad \hat{\sigma}^2(X) = \frac{1}{200-1} \sum_{i=1}^{200} (X_i - \bar{X})^2 \quad (4.10)$$

Die letzten beiden Reihen der Tabelle zeigen für jedes Modell die Anzahl der Sektoren, für die es das hybride Modell im Hinblick auf MAPE bzw. MSE bessere Leistungen als alle anderen Methoden erbringt.

Tabelle 4.1: Übersicht der Prognoseergebnisse von 200 1-Km-Langen Sektoren

	Hybrid	AR	Polynomisch	Exp. Smooth.	Naive
$\hat{\mu}(\text{MAPE})$	16,2%	18,7%	45,9%	24,7%	19,6%
$\hat{\sigma}^2(\text{MAPE})$	$2,79 \times 10^{-3}$	$3,59 \times 10^{-3}$	$13,1 \times 10^{-3}$	$4,18 \times 10^{-3}$	$3,97 \times 10^{-3}$
$\hat{\mu}(\text{MSE})$	0,0149	0,0193	0,116	0,0314	0,0225
$\hat{\sigma}^2(\text{MSE})$	$3,85 \times 10^{-4}$	$3,44 \times 10^{-4}$	$37,0 \times 10^{-4}$	$3,93 \times 10^{-4}$	$3,36 \times 10^{-4}$
Sectors Best MAPE	61,5%	16,5%	0%	10%	12%
Sectors Best MSE	66,5%	17%	0%	8%	6,5%

Der kleinste Erwartungswert sowohl bei MAPE (16,2%) als auch für MSE (0,0149) wird durch die Nutzung des hybriden Modells erhalten. Die minimale Varianz des MAPE ( $2,79 \times 10^{-3}$ ) wird auch mit dem hybriden Modell erreicht, aber im Falle der Varianz des MASE korrespondiert der minimale Wert ( $3,44 \times 10^{-4}$ ) zum autoregressiven Modell (AR). Das hybride Modell ist demnach auf den meisten Gleisabschnitten das angebrachteste, sowohl im Sinne des MAPE (61,5%) als auch im Sinne des MSE (66,5%). Das generische Modell und das exponentielle Glättungsmodell versagen dabei, die Gesamtleistungsfähigkeit des naiven Modells zu übertreffen, wohingegen das hybride Modell eine MAPE-Reduktion von 17,3% und eine MSE-Reduktion von 33,8% bezüglich des naiven Modells erreicht und das AR-Modell eine MAPE-Reduktion von 4,59% und eine MSE-Reduktion von 14,2% in Bezug auf das naive Modell erreicht. Die relativ geringen Varianzen von MAPE und MSE, die von dem hybriden Modell erreicht werden, zeigen, dass die Annäherung stabil ist, indem es in Sektoren mit unterschiedlichen Verschleißcharakteristika zufriedenstellende Resultate liefert.

## 4.5 Ausblick

Dieses Kapitel stellt einen Ansatz zur Erstellung von Vorhersagen des Gleisgeometrie-verlaufs vor, der den grundlegenden Alterungs- und Instandsetzungsprozess als hybrid modelliert. Die Ergebnisse wurden durch die Anwendung des hybriden Modells auf die in den vergangenen 20 Jahren auf einer 200 km langen Hochgeschwindigkeitsstrecke gesammelten Daten gewonnen und wurden mit anderen Modellen aus der Fachliteratur verglichen. Dieser Vergleich zeigt, dass das hybride Modell im allgemeinen bessere Resultate erreicht, nicht zuletzt dank seiner gesteigerten Adaptivität nach Stopfarbeiten, welche vorwiegend dem hybriden Prozessmodell zuzuschreiben ist.

Der hiermit präsentierte Ansatz wird im Rahmen des im Kapitel 5 eingeführten Optimierungsverfahrens für Stopfeingriffsplanung angewendet.

# Kapitel 5

## Optimale Planung der Stopfeingriffe

### 5.1 Einleitung

Die Vermessung der Gleisgeometrie und ihre Instandsetzung durch Gleisstopfeingriffe sind fundamentale Aufgaben des Instandhaltungsprozesses der Eisenbahninfrastruktur. Die Gleisgeometrie ist ein Merkmal des Reisekomforts und des Entgleisungsrisikos, so dass ab dem Moment, in dem ihr Fehler den vorgegebenen Grenzwert übersteigt, die Fahrtgeschwindigkeit reduziert werden muss. Daher gilt die Gleisgeometrie sowohl als Maß für Reisequalität wie auch -sicherheit. Aus diesen Gründen hat der französische Eisenbahnbetreiber SNCF seit seiner Inbetriebnahme vor mittlerweile über 20 Jahren die geometrischen Eigenschaften seines Hochgeschwindigkeitsnetzes regelmäßig vermessen.

Die für die Durchführung von Stopfarbeiten erforderlichen technischen und personellen Ressourcen sind ein erheblicher Kostenfaktor bei Hochgeschwindigkeitsbahnsystemen [ESVELD, 2001]. Weiterhin ist es angesichts der hohen logistischen Kostenfaktoren notwendig, die meisten Instandhaltungstätigkeiten der Gleisgeometrie ein Jahr im voraus zu planen. In diesem Zusammenhang stellt sich eine in dieser Arbeit zentrale Frage: **Wann und wo sollten angesichts der verfügbaren menschlichen und technischen Ressourcen sowie des derzeitigen Gleisgeometriefehlers Stopfeingriffe vollzogen werden?**

Dieses Kapitel stellt eine Antwort zu dieser Frage vor. Sie besteht aus einer heuristischen Methode zur Planung der Stopfeingriffe. Dazu wird eine Reihe von Eingabedaten benötigt, namentlich eine Datenbank mit den verfügbaren Gleisgeometrievermessungen, einige Eigenschaften der verfügbaren Stopfmaschinen und das topologische Charakteristikum des Schienennetzwerks, das instand gehalten werden muss.

Abschnitte 5.2 und 5.3 präsentieren die für die Erzeugung des Stopfplans verwendeten heuristischen Algorithmen und in Abschnitt 5.4 wird die Methode mittels zweier Fallstudien auf Basis realen Daten einer französischen Hochgeschwindigkeitsstrecke validiert. Abschließend beinhaltet Abschnitt 5.5 einige abschließende Bemerkungen.

## 5.2 Eingriffsplanungsmethode

Generell wird für die Ermittlung einer Lösung für ein Optimierungsproblem ein Prozessmodell eingesetzt. Ist das Modell hochgradig komplex, ist i. d. R. keine Standardoptimierungsmethode direkt anwendbar. In einem solchen Fall gibt es zunächst zwei Möglichkeiten: Das Modell adaptieren, um es an eine Standardoptimierungsmethode anzupassen, oder eine neue Methode adaptieren oder entwickeln, die dem hochkomplexen Modell entspricht.

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, lassen sich in der Literatur einige Ansätze zum Problem der Planung der Gleisgeometrieinstandhaltung finden. So adaptieren [OYAMA und MIWA, 2006] und [OH et al., 2006] das Prozessmodell, indem sie einige Bedingungen relaxieren und dann kommerzielle, lineare Optimierungssoftwarepakete anwenden, wie in Ansatz *B* in Abb. 2.7 dargestellt.

Die in diesem Kapitel eingeführte Planungsmethode ähnelt in dieser Hinsicht vielmehr [LAKE et al., 2000] und somit Ansatz *C* in Abb. 2.7. Er besteht hauptsächlich aus einem heuristischen Algorithmus und wird in Kombination mit dem im Kapitel 3 präsentierten Prozessmodell angewendet. Der heuristische Algorithmus gibt zwei Ergebnisse zurück: Eine Obergrenze für die Gesamtlösungsgüte und eine durchführbare Lösung, welche die beste ist, die gefunden werden konnte. Die Obergrenze stellt ein Wert dar, der gewährleistet größer bzw. gleich der Güte der optimalen durchführbaren Lösung ist. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.4 präsentiert und zeigen, dass die Güte der besten gefunden durchführbaren Lösung sehr nah an der Obergrenze liegt (die Differenz ist kleiner als 0,15%), was das große Leistungspotential des heuristischen Algorithmus verdeutlichen soll.

### 5.2.1 Problemdefinition

Zwecks der Formalisierung der Problemdefinition, wird das Schienennetz in Form eines Graphs modelliert. Die Kanten repräsentieren die Schienenverläufe und die Knoten entsprechen den Weichen. Die Kanten sind in Sektoren von 200 m eingeteilt. Dann muss eine Gütefunktion aufgestellt werden, um die Güte der Durchführung eines Stopfeingriffs in jedem Sektor abzuschätzen. In Abschnitt 5.2.2 werden etliche mögliche Gütefunktionen präsentiert. **Das Problem, welches der heuristische Planungsalgorithmus löst, besteht darin, eine aus  $N$  Eingriffen bestehende (einer je Nacht) durchführbare Lösung, im Folgenden Stopfkampagne benannt, zu finden, welche die definierte Zielfunktion maximiert. Die Zielfunktion stellt die mathematische Repräsentation der Interessen des Schienennetzbetreibers dar.**

Des Weiteren müssen folgende Randbedingungen für die Planung von Stopfarbeiten angenommen werden:

1. Stopfeingriffe finden während der nächtlichen Betriebspause statt. Dies bedeutet, dass jede Nacht ca. vier bis fünf Stunden zur Verfügung stehen.

2. Zwecks der Vermeidung unnötiger Stopfarbeiten, darf jeder Sektor innerhalb einer Stopfkampagne maximal ein Mal gestopft werden.
3. Die Anzahl der Stopfmaschinen ist für das gesamte Schienennetz begrenzt. Deshalb steht für jede Strecke nur für eine begrenzte Anzahl von  $N$  Nächten, welche für gewöhnlich aufeinander folgen, eine Stopfmaschine zur Verfügung. Insofern besteht jede Stopfkampagne aus  $N$  aufeinanderfolgenden Nächten, nämlich die Nächte in denen eine Stopfmaschine für die betroffene Strecke zur Verfügung steht.
4. Jede Stopfmaschine hat eine begrenzte Fahrgeschwindigkeit  $S_{Trav}$  und eine Stopfgeschwindigkeit  $S_{Tamping}$ .
5.  $T_{Auf}$  stellt die Aufrüstungszeit dar, die zwischen Ankunft am Startsektor und dem Eingriffsbeginn benötigt wird und  $T_{Ab}$  ist die Abrüstungszeit, die zwischen Ende der Stopfarbeit und Abfahrt zum Enddepot benötigt wird.
6. Für das Stopfen von Weichen und ihrer Umgebung werden spezielle Maschinen benötigt. Weiterhin sind die ersten und letzten 200 m bei einem Stopfeingriff Übergangsbereiche, auch bekannt als *Rampen*, die zur Glättung des Überganges von möglicherweise lange nicht gestopften, abgetragenen Sektoren zu frisch gestopften Sektoren verwendet werden. Nach Expertenmeinung sollte die Anzahl von Übergangssektoren gering gehalten werden. Dies führt zu einem weiteren Schluss: Um die Anzahl der Übergangssektoren zu minimieren, müssen zunächst Nachtstopfeingriffe zusammenhängend sein, d. h. sie dürfen nur in aneinander grenzenden Sektoren stattfinden, die alle dem gleichen Gleis angehören (Weichen können nur mit speziellen Maschinen gestopft werden). In Abschnitt 5.3 wird diese Beschränkung relaxiert und es wird die Unterteilung der Eingriffe in zwei Teile, die sich evtl. in zwei verschiedenen Gleisen befinden, zugelassen.
7. In der Absicht, den normalen Eisenbahnverkehr nicht zu behindern, muss die Stopfmaschine vor der ersten planmäßigen Durchfahrt auf einem Nebengleis abgestellt werden, auch bekannt als Depot. Hinzu kommt, dass die Maschine in der ersten Eingriffsnacht von einem vorgegebenen Depot aufgegriffen und nach der letzten Stopfung ebenfalls in einem vorgegebenen Depot abgestellt werden muss.

Das betrachtete Streckennetzwerk wird anhand eines Graphen modelliert. Diser Graph besteht aus der Menge gerichteter Kanten  $K$  wie in Gl. 5.1 definiert. Jede Kante  $k$  besteht wiederum aus einer Reihe von aufeinander folgenden Sektoren wo  $S_{k_{init}}$  der erste,  $S_m$  der mittlere und  $S_{k_{end}}$  der letzte Sektor ist, vgl. Gl. 5.2.

$$K = 1, \dots, K^m \quad (5.1)$$

$$k = \{S_{k_{init}}, \dots, S_m, \dots, S_{k_{end}}\} \quad (5.2)$$

Jeder Eingriffsplan setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Eingriffsnummer  $i, i \in 1, \dots, N$
- Startdepot  $Dinit_i$  und Enddepot  $Dend_i$
- Eingriffsstartsektor  $Sinit_i$  und Eingriffsendsektor  $Send_i$

Ungleichung 5.3 sagt aus, dass die Betriebspausezeit für die Instandhaltungsrotte ausreichen muss, um mit der Maschine von Anfangsdepot  $Dinit$  bis zum Eingriffsstartsektor  $Sinit$  zu gelangen, die Arbeitsvorbereitungen zu treffen (Dauer, den Gleisabschnitt zu sperren,  $T_{Auf}$ ), den eigentlichen Eingriff durchzuführen, Abfahrtbereitschaft herzustellen (Dauer, den Abschnitt wieder freizugeben,  $T_{Ab}$ ) und vom Eingriffsendsektor  $Send$  zum Enddepot  $Dend$  zu fahren.

$$T_{SI} \geq (Dist(Dinit_i, Sinit_i) + Dist(Send_i, Dend_i))/S_{Fahrt} + T_{Auf} + T_{Ab} + Dist(Sinit_i, Send_i)/S_{Stopf} \quad (5.3)$$

mit

$$\begin{aligned} T_{SI} & : \text{Nächtliche Betriebspausedauer} \\ T_{Auf}, T_{Ab} & : \text{Auf- und Abrüstungszeit} \\ Dist(Dinit_i, Sinit_i) & : \text{Länge der Fahrstrecke zwischen } Dinit_i \text{ und } Sinit_i \end{aligned}$$

Eine Richtung wird arbiträr auf jede Kante bezogen und Gleissektoren werden dieser Richtung nach nummeriert. Um Eingriffe eindeutig zu definieren kann unter Annahme dieser Sektorenaufzählung die Rahmenbedingung 5.4 getroffen werden: die Nummerierung des Eingriffsstartsektors muss gleich oder größer als die des Eingriffsendsektors sein.

$$Sinit_i \geq Send_i \forall i : i \in 1 \dots N \quad (5.4)$$

Die Gesamtgüte eines Eingriffs kann mit Gl. 5.5 ermittelt werden.

$$G(E_i) = \sum_{j=Sinit_i}^{Send_i} G(j) \quad (5.5)$$

mit

$$\begin{aligned} G(E_i) & : \text{Gesamtgüte der Durchführung des Einsatzes } E_i \\ G(j) & : \text{Güte der Durchführung eines Stopfeingriffs auf Sektor } j, \text{ vgl. Abschnitt 5.2.2} \end{aligned}$$



Das Optimierungsproblem kann also anhand von Ausdruck 5.6 definiert werden, wobei  $Z$  als Zielfunktion bezeichnet wird.

$$Z(E_1, \dots, E_N) = \sum_{i=1}^N G(E_i) \rightarrow \max \quad \text{und Bedingungen 1 bis 7 sowie Ungl. 5.3 gelten} \quad (5.6)$$

### 5.2.2 Gütefunktion

Die Gütefunktion ist ein entscheidender Teil der gesamten Planungsmethode. Sie sollte die Ziele des Gleisstandhaltungsprozesses ausdrücken, die sich bei den verschiedenen Betreibern signifikant unterscheiden können. Im Folgenden werden drei mögliche Implementierungen präsentiert.

**Gesamtreduktion des Gleisgeometrieverschleißes.** Die Güte eines Stopfeingriffs ist direkt proportional zum momentanen Gleisgeometriefehler  $NL$ . Dies bedeutet, dass die Verschleißgeschwindigkeit  $\frac{\partial NL}{\partial t}$  nicht berücksichtigt wird. Dieser Ansatz wird bei [OYAMA und MIWA, 2006] verwendet.

**Erwartete Ausfallzeit.** Der Vorteil eines Stopfeingriffs ist umgekehrt proportional zu der Dauer, bis der maximal erlaubte Gleisgeometriefehler  $NL_{max}$  erreicht wird. Diese Ausfallzeit kann durch die in Kapitel 4 dargestellte Vorhersagemethode abgeschätzt werden.

**Prognostizierte  $NL$  bei der nächsten Stopfkampagne.** Sei  $h$  die Zeit zwischen zwei Stopfkampagnen (für Hochgeschwindigkeitsstrecken üblicherweise zwischen zwei Jahren und sechs Monaten). Ferner sei angenommen, dass die optimale Planung einer Stopfkampagne zum Zeitpunkt  $t = t_0$  angestrebt wird. Dann könnte ein geschätzter Wert von  $NL$  zum Zeitpunkt der darauf folgenden Kampagne  $t = t_0 + h$  ein Maß für die Stopfgüte sein. Je weiter die Prognose  $\widehat{NL}(t_0 + h)$  den Wert  $NL_{max}$  übersteigt, desto wertvoller ist die Ausführung eines Stopfeingriffs zum Zeitpunkt  $t = t_0$ . Ähnlich gilt: Je weiter  $NL_{max}$   $\widehat{NL}(t_0 + h)$  übersteigt, desto geringer ist die Notwendigkeit, einen Stopfeingriff in der kommenden Woche auf diesem Sektor auszuführen. Die punktuelle Vorhersage  $\widehat{NL}(t_0 + h)$  repräsentiert den erwarteten Wert. Solange das zugrunde liegende Prozessmodell stochastisch ist (vgl. Abschnitt 3.2), kann ein Konfidenzintervall ebenfalls in die Zielfunktion eingebunden werden.

Weiterhin könnte die Gütefunktion an dem Ziel angepasst werden, dass  $NL(t)$  nie höher als ein vorgegebener  $NL_{max}$  ist. Dies könnte durch Erstellen einer nicht kontinuierlichen Gütefunktion mit einem positiven Sprung, wo  $NL(t)$  dem maximal zulässigen Wert  $NL_{max}$  gleicht, erreicht werden. Dadurch könnte das Übertreten von  $NL_{max}$  beliebig streng bestraft werden.

In den Fallstudien in Abschnitt 5.4 wird für die Formulierung der Gütefunktion der geschätzte Längshöhenfehler bei der nächsten Stopfkampagne, d. h.  $\widehat{NL}(t_0+h)$ , benutzt.

### 5.2.3 Heuristik

Unter Berücksichtigung der Problemdefinition in Abschnitt 5.2.1 kann ein heuristischer Algorithmus wie folgt beschrieben werden:

1. Sei ein Eingriff  $E$  *maximal*, sofern folgende Bedingungen erfüllt sind:
  - (a) Er besteht aus aufeinanderfolgenden Gleissektoren, vgl. Randbedingung 1 in Abschnitt 5.2.1).
  - (b) Alle seine Gleissektoren gehören dem gleichen Gleis, vgl. Randbedingung 6 in Abschnitt 5.2.1.
  - (c) Er ist durchführbar, also Ungl. 5.3 gilt.
  - (d) Eine Änderung von  $S_e$  auf  $S_{e+1}$ , also eine Erweiterung der Eingriffslänge, würde den Eingriff undurchführbar machen, Ungl. 5.3 würde nicht mehr gelten.
  - (e) Seine Anfangs- und Enddepot sind gleich und sind das Depot, das dem Eingriffsanfangssektor  $S_i$  am nächsten liegt.

Also besteht der erste Schritt der Heuristik darin, für jede Kante  $i$  die Menge aller maximalen Eingriffe zu finden und anhand der Gütefunktion  $G$  in Abschnitt 5.2.2 für jeden einzelnen seine Güte  $G(E)$  nach Gl. 5.5 zu finden.

2. Sei  $K = 1, \dots, K^m$  die Menge der Kanten des Graphen, die das Netzwerk repräsentiert (vgl. Gl. 5.1) und  $N^k$  die Anzahl der Eingriffe, die benötigt werden, um auf der gesamten Kante  $k$  Stopfarbeiten durchzuführen. Der zweite Schritt besteht darin für jede  $k \in 1, \dots, K^m$  und jedes  $n \in 1, \dots, N^k$  die Menge  $M_{k,n}$  bestehend aus  $n$  maximalen Eingriffen in der Kante  $i$ , welche die Zielfunktion  $G$  maximiert, zu ermitteln. Zusammenfassend:  $M_{k,n}$  stellt die optimale Lösung dar, wenn nur Kante  $k$  betrachtet wird und genau  $n$  Eingriffe geplant werden müssen. Dies ist der Abschnitt der heuristischen Berechnungen, der die größte Rechenleistung erfordert, weil bei jeder Kante  $k$  die Menge  $M_{k,n_0+1}$  nicht unbedingt einfach die Menge  $M_{k,n_0}$  zuzüglich eines anderen Eingriff ist, sondern eine gänzlich andere Menge sein könnte, sodass für jedes  $n \in 1, \dots, N^i$  alle möglichen Kombinationen ermittelt werden müssen. Es steht jedoch fest, dass Eingriffe *maximal* im Sinne von Schritt 1 sein müssen und keine gemeinsame Sektoren haben dürfen (das würde mehrfache Eingriffe an demselben Sektor bedeuten). Das hält die Anzahl der Kombinationen innerhalb einer annehmbaren Grenze, selbst für Kanten mit 300 Sektoren, wie in den Fallstudien im Abschnitt 5.4 verdeutlicht wird.

3. Der dritte Schritt besteht darin, unter den im Schritt 2 ermittelten Mengen  $M_{i,n}$ , die Menge der maximalen Eingriffe  $L = \{M_{i_1,n_1}, M_{i_2,n_2}, \dots, M_{i_m,n_m}\}$  zu finden welche die Zielfunktion  $Z$  wie in Gl. 5.6 definiert, maximiert und zwar unter den Bedingungen, dass jeder Kante maximal eine Menge in  $L$  gehört, d. h.  $i_j \neq i_l \forall j, l : j, l \in 1, \dots, m \wedge l \neq m$  und die Gesamtzahl der Eingriffe gleich der Anzahl der zu planenden Eingriffe  $N$  ist, d. h.  $\sum_{k=1}^m n_k = N$ . Dieser Schritt ist rechnerisch unaufwendig, weil in diesem Fall gilt, dass die Lösung für  $n$  Tage in der Lösung für  $n + 1$  Tage enthalten ist. Die Menge  $L$  entspricht der Menge von disjunkten (also ohne gemeinsame Sektoren), *maximalen* Eingriffen, die die Zielfunktion maximiert. Die einzigen Zusatzanforderungen, die sie noch für die Gewährleistung ihrer Durchführbarkeit zu erfüllen hat, bestehen darin, dass das Startdepot des ersten Eingriffs und das Enddepot des letzten Eingriffs mit den vorgegebenen Depots übereinstimmen (vgl. Abschnitt 5.2.1) und das Enddepot des jeweiligen Tages dem Startdepot des nächsten Tages gleicht, d. h.  $D_i(j) = D_i(j + 1) \forall j : j \in 1, \dots, N - 1$ .
4. Seien *Überbrückungseingriffe* definiert als Eingriffe, für die das Startdepot ungleich dem Enddepot ist, d. h.  $D_i \neq D_e$ . Aufgrund des verwendeten Kalkulationsprozesses enthält die Lösung  $L$  keine *Überbrückungseingriffe*. Also müssen einige Eingriffe in  $L$  durch *Überbrückungseingriffe* ersetzt werden, so dass das Startdepot des ersten Eingriffs und das Enddepot des letzten Eingriffs die vorgegebenen sind und alle Depots, die in Lösung  $L$  enthalten sind, zumindest einmal besucht werden. Dann würde die entsprechende Umsetzung darin bestehen, *Überbrückungseingriffe* so auszuwählen, dass die Reduktion der Gesamtgüte, die sich daraus ergibt, minimal ist. Dabei handelt es sich um nichts anderes als das gut bekannte Problem des Handlungsreisenden [MICHALEWICZ und FOGEL, 2002, S. 61]. Jedoch besteht eine notwendige Bedingung für die Lösung dieses Problems darin, die Kosten (d. h. die dabei entstehende Güteverlust) zu kennen, um von einem Knoten zum anderen zu gelangen. Die Berechnung dieser Kosten gestaltet sich als sehr schwierig, da die Anzahl möglicher Kombinationen enorm ist, sodass eine lokale Suche vorgezogen wird. Die Kosten für das Einbringen eines *Überbrückungseingriffs* von Depot  $j$  nach  $k$  werden also wie folgt abgeschätzt: Seien  $E_m$  mit  $m \in 1 \dots N$  die Einsätze in  $L$ . Dann sei  $E\ddot{u}_m$  der beste (mit der größten Güte) *Überbrückungseingriff* zwischen den Depots  $j$  und  $k$  durch den  $E_m$  in  $L$  ersetzt werden kann. Dieser Ersatz bringt eine Reduktion der Gesamtgüte von  $L$  in Höhe von  $Red_m = Güte(E_m) - Güte(E\ddot{u}_m)$  mit sich. Dann gleichen die Kosten der Einbringung eines *Überbrückungseingriffs* zwischen den Depots  $j$  und  $k$   $\min(Red_1, \dots, Red_N)$ . Da der beschriebene Prozess vorwiegend in einer lokalen Suche besteht, kann nicht gewährleistet werden, dass die ermittelten Kosten das mögliche Minimum darstellen, wie in Abschnitt 5.4 veranschaulicht.
5. Die fünfte und letzte Schritt des heuristischen Algorithmus besteht darin, die Lösung  $L$  in eine durchführbare Lösung  $L_d$  zu konvertieren, indem das im Schritt 4

entworfenen Problem des Handlungsreisenden gelöst wird. Dies geschieht mittels der *Branch & Bound* Methode [MICHALEWICZ und FOGEL, 2002, S. 101]. Dieser Ansatz besitzt den Vorteil, dass er die optimale Lösung findet, ohne notwendigerweise den gesamten Suchbaum zu untersuchen. Da die im Schritt 4 beschriebene Kostenkalkulation der Einführung von *Überbrückungseingriffen* potentiell suboptimal ist, kann auch die erzielte Lösung nicht optimal sein. Jedoch kann die maximale Abweichung zwischen der unbekannten optimalen Lösung und der ermittelten Lösung  $L_d$  berechnet werden, weil **der Wert der mit der Lösung  $L$  erreichte Zielfunktion eine obere Grenze für alle durchführbaren Lösungen darstellt.**

### 5.3 Modellerweiterung durch Zulassung der Unterteilung von Stopfeingriffen

In Abschnitt 5.2.1 wurde angenommen, dass jede Nacht nur eine Reihe aufeinander folgender Gleissektoren gestopft wird. Dies ist nach Expertenmeinung erwünscht, weil die Anzahl der Transitionen zwischen gestopften und nicht gestopften Sektoren hierdurch minimiert wird. Zudem führt die Unterteilung zu weniger effektiv gestopften Sektoren, indem die doppelte Auf- und Abrüstungszeit erforderlich ist, und die Fahrtzeit zwischen dem Endsektor des ersten Teils und dem Anfangssektor des zweiten Teils der effektiven Stopfzeit angerechnet werden muss.

Jedoch kann mitunter die Unterteilung eines Eingriffs in zwei Teilen vorteilhaft sein. Ein solcher Fall wird exemplarisch in Abb. 5.1 gezeigt. Die Kurve zeigt den Wert von  $NL$  für eine Reihe aufeinander folgender Gleissektoren einer fiktiven Strecke.  $Sa$  ist der bestmögliche nicht unterteilte Eingriff, während  $Sb$  der bestmögliche unterteilte Eingriff ist, bestehend aus den Untereingriffen  $Sb_1$  und  $Sb_2$ . Obwohl die Länge von  $Sa$  größer als die Gesamtlänge von  $Sb$  ist, ist der Gesamtwert von  $Sb$  aufgrund der Verteilung der Werten von  $NL$  größer als der von  $Sa$ .

Die Zulassung solcher Unterteilungen führt zu einem viel komplexeren Optimierungsproblem. Eingriffe  $E$  können aus zwei Untereingriffen  $E1$  und  $E2$  bestehen. Ein unterteilter Eingriffsplan setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Eingriffsnummer  $i, i \in 1, \dots, N$
- Startdepot  $Dinit_i$  und Enddepot  $Dend_i$
- Eingriffsstartsektor 1  $S1init_i$  und Eingriffsendsektor 1  $S1end_i$
- Eingriffsstartsektor 2  $S2init_i$  und Eingriffsendsektor 2  $S2end_i$

Gl. 5.3 wird zu Gl. 5.7. Wie in Abschnitt 5.2.3 erwähnt, konnte bei zusammenhängenden Eingriffen jedem Sektor ein *maximaler Eingriff* eindeutig zugewiesen werden. Dies gilt

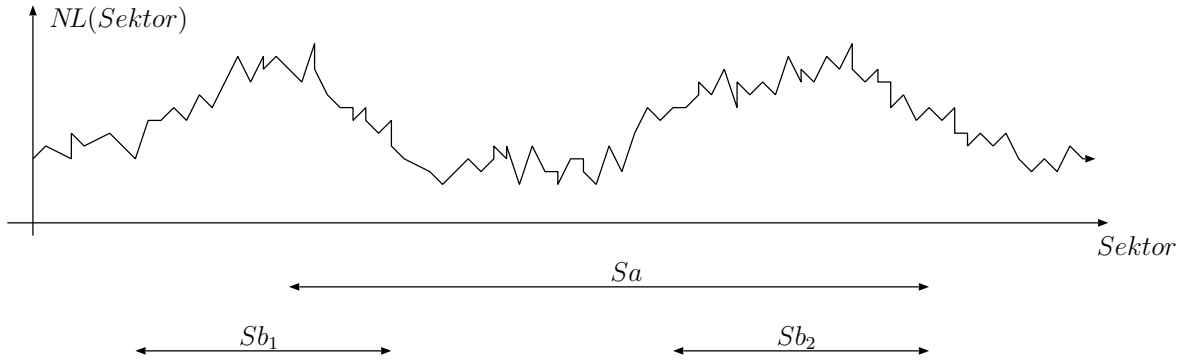


Abbildung 5.1: Vergleich eines zusammenhängenden ( $S_a$ ) und eines unterteilten ( $S_b$ ) Stopfeingriffs

doch bei unterteilten Eingriffen nicht, denn in Gl. 5.7 gibt es a priori drei Unbekannte: jeweils die Länge jedes Untereingriffs und die Entfernung zwischen beiden.

$$T_{SI} \geq \frac{\text{Dist}(D_{init_i}, S1_{init_i}) + \text{Dist}(S1_{end_i}, S2_{init_i}) + \text{Dist}(S2_{end_i}, D_{end_i})}{S_{Fahrt}} + \frac{\text{Dist}(S1_{init_i}, S1_{end_i}) + \text{Dist}(S2_{init_i}, S2_{end_i})}{S_{Stopf}} + 2T_{Auf} + 2T_{Ab} \quad (5.7)$$

- $T_{SI}$  : Nächtliche Betriebspausedauer  
 $S_{Fahrt}, S_{Stopf}$  : Fahr- bzw. Stopfgeschwindigkeit  
 $T_{Auf}, T_{Ab}$  : Auf- und Abrüstungszeit  
 $\text{Dist}(D_i, S_i)$  : Länge der Fahrstrecke zwischen  $D_i$  und  $S_i$

### 5.3.1 Erweiterte Heuristik

Im Folgenden wird eine erweiterte Heuristik beschrieben, welche unter der oben beschriebenen Relaxierung der Beschränkungen sehr gute Lösungen in annehmbarer Zeit ermitteln lässt.

1. Wie in Abschnitt 5.3 angedeutet, muss bei unterteilten Eingriffen neben dem ersten Anfangssektor die Entfernung zum zweiten und die Längen von beiden Teilen bestimmt werden. Da diese a priori unbekannt sind, müssen sie zunächst eingeschätzt werden. Eine zu optimistische Einschätzung kann zur Überschätzung ihrer Güte führen, eine zu konservative Einschätzung zur ihrer Unterschätzung. Sei  $S_i$  ein Sektor der Kante  $K$ . Dann kann die Einschätzung anhand von Gl. 5.8 erfolgen.

$$Dist(S1_e, S2_i) + Dist(S2_e, D_e) \approx Dist(S1_e, S_j) + Dist(S_{j+5}, D_i) \rightarrow \max \quad (5.8)$$

mit

$$S_e, S_j, S_{j+5} \quad : \quad S_e, S_j, S_{j+5} \in K$$

In Gl. 5.8 wird also die Annahme getroffen, dass beide Teilaufgaben in derselben Kante stattfinden. Die Summe der Distanz zwischen Untereingriffen und der Distanz vom zweiten Angriff zum nächsten Depot wird dann für jeden Sektor  $S_j \in K$  als Anfangssektor des zweiten Untereingriffs berechnet und der maximale Wert als Einschätzung genommen. Dies ist eine etwas konservative Einschätzung. Jedoch hat sie zur Folge, dass wenn die Annahme gilt, dass sich beide Untereingriffe in der gleichen Kante befinden, dann die anhand von Gl. 5.9 ermittelten Längen sind gleich oder kleiner als die endgültige Länge, weil die endgültige Fahrtzeit nur noch gleich oder kürzer sein kann.

$$TotalTravelTime = \frac{Dist(D_i, S1_i) + Dist(S1_e, S2_i) + Dist(S2_e, D_e)}{S_{Fahrt}}$$

$$Länge(S1) + Länge(S2) = Dist(S2_i, S2_e) + Dist(S2_i, S2_e) \quad (5.9)$$

$$\stackrel{5.7}{=} \frac{T_{SI} - TotalTravelTime - 2T_{Auf} - 2T_{Ab}}{S_{Stopf}}$$

Da nur die Einschätzung der Gesamtlänge der zwei Untereingriffe vorliegt, bedarf die Berechnung der Länge jedes Untereingriffs einer letzten Annahme. Da es *a priori* unbekannt ist, welche der beiden Teilaufgaben länger sein soll, wird zunächst angenommen, dass beide die gleiche Länge aufweisen, vgl. Gl. 5.10.

$$Länge(S1) = Länge(S2) \quad (5.10)$$

Sei also ein Untereingriff maximal, wenn er anhand von Gleichungen 5.8, 5.9 und 5.10 berechnet wurde. Dann kann für jeden Sektor  $S_i$  ein *maximaler Untereingriff* berechnet werden.

2. Wie im Schritt 2 der einfacheren Heuristik, besteht dieser Schritt darin, für jede Kante  $k \in \{1, \dots, K^m\}$  und jede Einsatznachtanzahl  $n \in \{1, \dots, N^k\}$ , die Einsatzmenge  $M_{k,n}$ , welche die Gütefunktion  $G$  maximiert, zu ermitteln. Dabei ist  $N^k$  die Anzahl der Eingriffe, die benötigt werden, um auf der gesamten Kante  $k$  Stopfarbeiten durchzuführen. In diesem Fall gilt Gl. 5.11, d. h.  $n$  ist die

Anzahl der maximalen Untereingriffe plus zwei mal die Anzahl der maximalen zusammenhängenden Eingriffe. Das gilt indem in einer Einsatznacht entweder zwei Untereingriffe oder ein zusammenhängender Eingriff stattfinden können. In diesem Fall ist der Suchraum viel größer, da jedem Gleissektor sowohl ein zusammenhängender maximaler Eingriff als auch ein Untereingriff im Sinne von Schritt 1 zugewiesen wird. Die für die Erforschung aller möglichen Lösungen erforderliche Rechenzeit könnte bei längeren Kanten über die wünschenswerten Grenzen hinaus gehen. Daher wird ein Suchalgorithmus eingesetzt, der auf der rekursiven Anwendung des folgenden Prinzips basiert:

$$n = n_{Teil} + 2n_{Shg} \quad (5.11)$$

mit

$$\begin{aligned} n &: \text{Anzahl der Einsatznächte} \\ n_{Teil} &: \text{Anzahl der Untereingriffe} \\ n_{Shg} &: \text{Anzahl der zusammenhängenden Eingriffe} \end{aligned}$$

Ziel ist die Ermittlung der Menge der maximalen Eingriffe  $M_{k,n}$ . Dabei ist die Kante  $k$  wie in Gl. 5.2 definiert, d. h. eine Reihe von aufeinander folgenden Gleissektoren, wo  $S_{k_{init}}$  der erste,  $S_m$  der mittlere und  $S_{k_{end}}$  der letzte Sektor ist, und Gl. 5.11 gilt.

Da die Eingriffen in  $M_{k,n}$  disjunkt sein müssen (kein Sektor darf mehr als ein Mal gestopft werden, vgl. Bedingung 2 in Abschnitt 5.2.1), muss einer und nur einer der folgenden drei Fälle zutreffen:

- (a) in  $M_{k,n}$  gibt es einen zusammenhängenden Eingriff  $E_{Shg}$  wie in 5.12 definiert, der den mittleren Sektor  $S_m$  beinhaltet. Dann seien  $k_1$  und  $k_2$  die Unterkanten jeweils rechts und links von  $E_{Shg}$  in  $k$ .

$$E_{Shg} = \{S_{Shg_{init}}, \dots, S_m, \dots, S_{Shg_{end}}\} \quad (5.12)$$

Dann gilt Gl. 5.13, d. h. die Menge  $M_{k,n}$  besteht aus der Vereinigungsmenge von  $M_{k_1,n_1}$ ,  $E_{Shg}$  und  $M_{k_2,n_2}$ , welche die Gütefunktion  $G$  maximiert, vorausgesetzt dass  $n_1 + n_2 = n - 2$ .

$$M1_{k,n} = M_{k_1,n_1} \cup E_{Shg} \cup M_{k_2,n_2} : G(M1_{k,n}) \rightarrow \max \quad (5.13)$$

mit

$$\begin{aligned} k_1 &:= \{S_{k_{init}}, \dots, S_{Shg_{init}-1}\} \\ k_2 &:= \{S_{Shg_{end}+1}, \dots, S_{k_{end}}\} \\ n_1, n_2 &: n_1 + n_2 = n - 2, \quad S_m \subset E_{Shg} \end{aligned}$$

- (b) in  $M_{k,n}$  gibt es einen Untereingriff  $E_{Teil}$  wie in 5.14 definiert, der  $S_m$  beinhaltet. Dann seien  $k_1$  und  $k_2$  die Unterkanten jeweils rechts und links von  $E_{Teil}$  in  $k$ .

$$E_{Teil} = \{S_{Teil_{init}}, \dots, S_{Teil_{end}}\} \quad (5.14)$$

Dann gilt Gl. 5.16, d. h. die Menge  $M2_{k,n}$  besteht aus der Vereinigungsmenge von  $M_{k_1,n_1}$ ,  $E_{Teil}$  und  $M_{k_2,n_2}$ , welche die Gütefunktion  $G$  maximiert, vorausgesetzt, dass  $n_1 + n_2 = n - 1$ .

$$M2_{k,n} := M_{k_1,n_1} \cup E_{Teil} \cup M_{k_2,n_2} : G(M2_{k,n}) \rightarrow \max \quad (5.15)$$

mit

$$\begin{aligned} k_1 &:= \{S_{k_{init}}, \dots, S_{E_{Teil_{init}}-1}\} \\ k_2 &:= \{S_{m+1}, \dots, S_{k_{end}}\} \\ n_1, n_2 &: n_1 + n_2 = n - 1, \quad S_m \subset E_{Teil} \end{aligned}$$

- (c) in  $M_{k,n}$  gibt es keinen Untereingriff der  $S_m$  beinhaltet. Dann seien  $k_1$  und  $k_2$  die Unterkanten jeweils rechts und links von  $E_{Teil}$  in  $k$ . Dann gilt Gl. 5.16, d. h. die Menge  $M_{k,n}$  besteht lediglich aus der Vereinigungsmenge von  $M_{k_1,n_1}$  und  $M_{k_2,n_2}$ , welche die Gütefunktion  $G$  maximiert, vorausgesetzt dass  $n_1 + n_2 = n$ .

$$M3_{k,n} := M_{k_1,n_1} \cup M_{k_2,n_2} : G(M3_{k,n}) \rightarrow \max \quad (5.16)$$

mit

$$\begin{aligned} k_1 &:= \{S_{k_{init}}, \dots, S_{m-1}\} \\ k_2 &:= \{S_{m+1}, \dots, S_{k_{end}}\} \\ n_1, n_2 &: n_1 + n_2 = n - 1 \\ S_m &: S_m \subset E_{Teil} \end{aligned}$$

Da es *a priori* unbekannt ist, welcher der drei Fälle zutrifft, müssen  $M1_{k,n}$ ,  $M2_{k,n}$  und  $M3_{k,n}$  ermittelt werden.  $M_{k,n}$  ist dann unter  $\{M1_{k,n}, M2_{k,n}, M3_{k,n}\}$  die mit der größten Güte, vgl. Gl. 5.17.

$$M_{k,n} := Mi_{k,n} : G(Mi_{k,n}) = \max\{G(M1_{k,n}), G(M2_{k,n}), G(M3_{k,n})\} \quad (5.17)$$



Durch dieses Verfahren kann also  $M_{k,n}$  als die Vereinigungsmenge der Lösung von kleineren Teilproblemen ermittelt werden und stellt eine Anwendung des Grundsatzes *teile und herrsche* dar. Der hiermit dargestellte Algorithmus wird rekursiv aufgerufen bis  $n = 1$ , wo die Lösung trivial ist. Rechnerisch hat dies den Vorteil, dass jede  $M_{k,n}$  nur einmal ermittelt und dann in einer Matrix gespeichert wird. Das Ergebnis davon ist eine rasche Berechnung ohne Relaxierungen, d. h. das erreichte Ergebnis ist genau das gleiche einer vollständigen Erforschung.

3. Der dritte Schritt besteht darin, unter den im Schritt 2 ermittelten Mengen  $M_{k,n}$  die Menge der maximalen Eingriffe  $L$  zu finden, welche die Zielfunktion  $G$  maximiert, unter den Bedingungen, dass jeder Kante nicht mehr als ein  $M_{k,n}$  gehört und die Gesamtzahl der Eingriffe gleich der Anzahl der zu planenden Eingriffe  $N$  ist, vgl. Gl. 5.18.

$$L := \{M_{k_1, n_1}, M_{k_2, n_2}, \dots, M_{k_m, n_m}\} : G(L) \rightarrow \max \quad (5.18)$$

mit

$$\begin{aligned} k_j &\neq k_l \quad \forall k, l : k \neq l \wedge k, l \in 1, \dots, m \\ \sum_{k=1}^m n_k &= N \end{aligned}$$

Im Gegensatz zu Schritt 2 muss hier darauf geachtet werden, dass alle Teilaufgaben paarweise verknüpft werden müssen um einen vollständigen Einsatz zu bilden. Wenn die zwei Teilaufgaben sich in der gleichen Kante befinden, ist es gewährleistet, dass die Gesamtgüte des aus den zwei Untereingriffen bestehenden Eingriffs zumindest so groß wie die zuvor im Schritt 1 eingeschätzte Güte ist. Daher besteht keine Gefahr, wenn die Anzahl von Teilaufgaben, die in einer Kante vorliegen, gerade ist. Wenn jedoch diese Anzahl ungerade ist, muss zumindest eine dieser Teilaufgaben mit einer Teilaufgabe in einer anderen Kante verknüpft werden. Wenn diese zu weit von einander entfernt liegen, könnte ihre Güte kleiner als die Einschätzung vom Schritt 1 sein und daher ein Anschluss in den Stopfplan nicht optimal sein. Mit der Absicht, solche Fälle zu vermeiden, wird zunächst eine Lösung  $L1$  nach Gl. 5.19 berechnet, d. h. eine Lösung mit zusammenhängenden Eingriffen und einer geraden Anzahl von Untereingriffen, vgl. Gl. 5.11.

$$L1 := \{M_{k_1, n1_1}, M_{k_2, n1_2}, \dots, M_{k_m, n1_m}\} : G(L1) \rightarrow \max \quad (5.19)$$

mit

$$\begin{aligned} n1_1, \dots, n1_m &: \sum_{i=1}^m n1_i = 2N \\ n1_i &: n1_i \bmod 2 = 0 \forall i \in \{1, \dots, m\} \end{aligned}$$

Danach wird versucht weitere Teilaufgaben einzuschließen. Hierzu werden für jedes Kantenpaar  $k_i, k_j : i \neq j \wedge i, j < m$  eine Teilaufgabe hinzugefügt bzw. entfernt und neue Eingriffe durch Verknüpfungen von Untereingriffen in abweichenden Kanten hergestellt. Dabei wird die Gesamtanzahl der Eingriffe eingehalten. Wenn dadurch ein Inkrement der Gesamtgüte erreicht wird, wird die Änderung angenommen und durch Wiederholung dieses Vorganges nach weiteren Untereingriffen gesucht. Wenn keine Verbesserung mehr möglich ist, d. h. wenn keine weitere Untereingriffe gefunden werden können, die die Gesamtgüte steigern, dann wurde die Lösung  $L$  erreicht, bestehend aus den besten gefundenen disjunkten (ohne gemeinsame Gleissektoren)  $N$  Eingriffen. Da das hiermit beschriebene Verfahren eine lokale Suche darstellt, ist die Optimalität der Lösung  $L$  nicht gewährleistet, d. h. es könnte bessere Lösungen geben. Deswegen ist es nicht wie mit der Heuristik von Abschnitt 5.2 möglich, eine obere Grenze für die Gesamtgüte des Stopfplans zu ermitteln.

4. Zuletzt wird äquivalent zum vierten und fünften Punkt der vereinfachten Heuristik in Abschnitt 5.2.3 vorgegangen, d. h. die Lösung  $L$  wird in eine durchführbare Lösung  $L_d$  durch das Hinzufügen von *Überbrückungseinsätzen*, d. h. Einsätze wo Start- und Enddepot voneinander abweichen, konvertiert.

Aus Untereingriffen bestehende Eingriffe sind manchmal sehr gute Kandidaten für Überbrückungseinsätze. Dies trifft insbesondere zu, wenn dem einen Untereingriff nicht das gleiche Depot am nächsten liegt, wie dem anderen, weil dieser Eingriff als Überbrückung zwischen den beiden Depots dank seiner kürzeren Gesamtfahrtzeit sogar eine größere Güte haben könnte, als ein normaler Eingriff.

## 5.4 Fallstudien

In diesem Abschnitt wird der vorgestellte Planungsoptimierungsalgorithmus exemplarisch auf zwei auf realen Daten basierende Fallstudien angewendet. In Abschnitt 5.4.1 wird das Problemcharakteristikum beschrieben. Daraufhin wird der Algorithmus für die Lösung zwei verschiedener Aufgaben eingesetzt: in Abschnitt 5.4.2 wird der Stopfplan für eine vorgegebene Anzahl von Einsatznächten  $N$  ermittelt während in Abschnitt 5.4.3 wird der Stopfplan erzielt, der die jährlichen Gesamtkosten der Stopfarbeiten unter Einhaltung vorgegebener Gleisgeometriefehlergrenzen minimiert.

### 5.4.1 Spezifizierung des Szenarios

Nachfolgend wird das Problemcharakteristikum stichpunktartig beschrieben.

- Das modelliertes Schienennetz wird in Abb. 5.2 dargestellt. Es besteht aus einem 120 km langen zweigleisigen Streckenabschnitt, d. h. die Gesamtstrecke beträgt 240 km. Dazu kommen drei Doppelweichen, die das Netz in acht Abschnitte von jeweils 30 km Länge teilen.

- Das Netz besitzt zwei Depots (Seitengleise, auf denen Stopfmaschinen während des Tages abgestellt werden), deren Abstand zueinander 60 km beträgt.
- Stopfkampagnen finden einmal jährlich statt.
- Depot 2 muss das Anfangsdepot des ersten Eingriffs ebenso wie das Enddepot des letzten Eingriffs jeder Kampagne sein.
- Eine Stopfmaschine mit einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h und einer Stopfgeschwindigkeit von 1,4 km/h steht während der Durchführung der Kampagne zur Verfügung.
- Eine Datenbank über die Gleisgeometriedaten der letzten 15 Jahre für jeden Gleisabschnitt von 200 m steht zur Verfügung, so dass insgesamt 1200 Sektoren betrachtet werden.
- Jeder Eingriff muss eine Gesamtdauer vom maximal fünf Stunden aufweisen, welches der Dauer der Nachtbetriebspause entspricht.

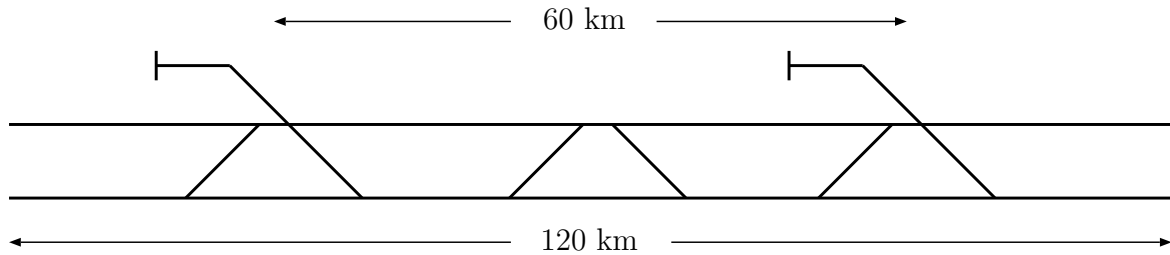


Abbildung 5.2: Modelliertes Schienennetz. Es besteht aus einem 120 km langen zweigleisigen Streckenabschnitt, d. h. die Gesamtstrecke beträgt 240 km.

Der erste Schritt in der Planungsmethode besteht darin, die Gütefunktion  $G$  im Sinne von Abschnitt 5.2.2 zu definieren, die am besten den Interessen des Betreibers entspricht. In dieser Studie wird, wie in Gl. 5.20 ausgedrückt, der prognostizierte  $NL$  bei der nächsten Stopfkampagne als Güte der Stopfung auf einem Gleissektor angenommen.

$$G(j, t) := \widehat{NL}_j(t_0 + h) \quad (5.20)$$

mit

- $G(j, t_0)$  : Güte eines Stopfeingriffs auf Sektor  $j$  zur Zeit  $t$ .  
 $\widehat{NL}(t + h)$  : Prognostizierte  $NL$  bei der nächsten Stopfkampagne, vgl. Abschnitt 5.2.2

Stopfkampagnen finden einmal im Jahr statt, sodass  $h = 1 \text{ Jahr}$ .

Die Schätzung  $\widehat{NL}(t+h)$  wird durch Anwendung des Prognoseverfahrens von Kapitel 4 gewonnen. Abb. 5.3 zeigt die interpolierten Werte der Prognose  $\widehat{NL}(t+h)$  für 100 aufeinander folgende Sektoren eines Abschnitts. Die Kurve verläuft sehr unregelmäßig, so dass signifikante Unterschiede sogar zwischen aufeinanderfolgenden Sektoren auftreten.

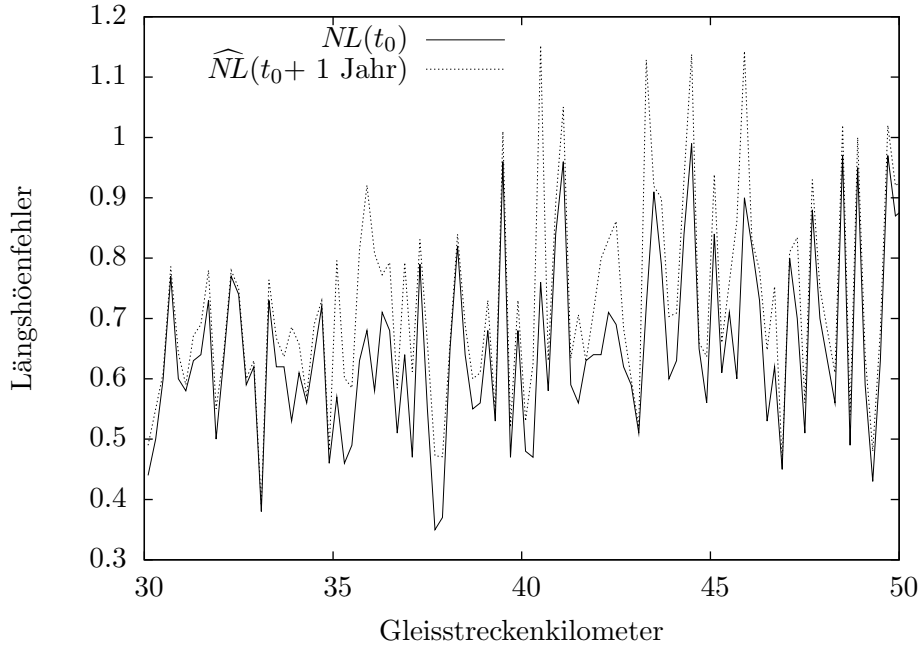


Abbildung 5.3: Letzter Messwert und erwarteter Längshöhenfehler einer Gleisstrecke mit einjährigem Prädiktionshorizont

#### 5.4.2 Fallstudie 1: Ermittlung eines Stopfplans für eine vorgegebene Anzahl von Einsatznächten $N$

In diesem Szenario wird angenommen, dass die Stopfmaschine für 20 Nächte zur Verfügung gestellt wird. Die Aufgabe besteht also darin, das von Gl 5.6 dargelegte Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Problemdefinition für die Anzahl von  $N = 20$  Einsatznächten zu lösen.

Der sich daraus ergebende Lösungsraum kann folgendermaßen ermittelt werden:

1. Wenn nur zusammenhängende Stopfeingriffe zugelassen sind:

$$\begin{aligned} \text{Lösungsraum} &= (N_{\text{Depots}}^2 \cdot N_{\text{Sektoren}})^{N_{\text{Eingriffe}}} \\ &= (2^2 \cdot 240 \cdot 5)^{20} \approx 10^{73} \end{aligned} \quad (5.21)$$

2. Wenn sowohl zusammenhängende wie auch unterteilte Stopfeingriffe zugelassen sind:

$$\begin{aligned}\text{Lösungsraum} &= (N_{\text{Depots}}^2 \cdot N_{\text{Sektoren}}^2)^{N_{\text{Eingriffe}}} \\ &= (2^2 \cdot (240 \cdot 5)^2)^{20} \approx 10^{147}\end{aligned}\quad (5.22)$$

Dies soll verdeutlichen, dass die Erforschung des gesamten Lösungsraums schlichtweg außer Frage steht.

Folglich werden zwei Eingriffspläne präsentiert: der eine enthält nur zusammenhängende Eingriffe und wurde mit der Heuristik von Abschnitt 5.2 ermittelt, während der andere sowohl zusammenhängende wie auch unterteilte, d. h. aus zwei Untereingriffen bestehende, Eingriffe beinhaltet und mit der erweiterten Heuristik von Abschnitt 5.3.1 ermittelt wurde.

Die berechneten Eingriffsplanungen können in den Tabellen 5.1 und 5.2 nachvollzogen werden.  $D_i$  und  $D_e$  stellen die Start- und Enddepots dar, beziehungsweise stellen  $S_i$  und  $S_e$  die Eingriffsstart- und -endsektoren dar. Die Länge wird in Sektoren ausgedrückt (jeder einzelne 200 m lang) und die ermittelte Güte bezieht sich auf Gl. 5.20. In Fettschrift stehen die *Überbrückungseingriffe*, nämlich Eingriffe 9 und 20 in Tabelle 5.1 und 7 und 20 in Tabelle 5.2. In Tabelle 5.2 stehen in Kursivschrift die *unterteilten* Eingriffe, nämlich Eingriffe 6, 19 und 20. Der Grund, warum einige Eingriffe länger als andere sind (die Längen variieren zwischen 25 und 30 Sektoren für zusammenhängende Eingriffe und 10 und 12 für Untereingriffe) liegt darin, dass je nach Entfernung zwischen den Anfangs- und Enddepots und den zu stopfenden Sektoren die Fahrzeiten und damit die für die eigentlichen Stopfeingriffe verfügbare Zeit sich erheblich unterscheiden können. Im Falle von unterteilten Eingriffen muss dazu die Entfernung zwischen beiden Untereingriffen angerechnet werden.

Im Plan ohne Untereingriffe **beträgt die Güte der besten gefundenen Lösung 179,92, wobei die Obergrenze für die Lösungsgüte 180,18 betrug**. Daraufhin ist Güte der ermittelten Lösung im schlechtesten Fall 0,14% geringeren als die Güte der optimalen Lösung. Wie in Abschnitt 5.3.1 erwähnt, kann unter Zulassung von Teilaufgaben keine Obergrenze für die Gesamtgüte ermittelt werden, aber die Gesamtgüte der berechneten Stopfplanung beträgt 181,30, d. h. 0,77% mehr als die ohne Untereingriffe. Der heuristische Algorithmus wurde in C++ implementiert. Unter Anwendung des Betriebssystems GNU/Linux **beträgt die Rechendauer für jeden Eingriffsplan weniger als eine Sekunde** unter Verwendung eines mit einem Pentium IV Prozessor und 1 GB RAM Arbeitsspeicher ausgestatteten marktgängigen Rechners.

### 5.4.3 Fallstudie 2: Minimierung der jährlichen Gesamtkosten der Stopfarbeiten

Wie in Abschnitt 5.4 erwähnt, finden Stopfkampagnen einmal im Jahr statt. Diese geplanten Eingriffe gelten als präventive Stopfarbeiten und werden mit den modernsten

[illegible][illegible]

Stopfmaschinen, die auf absoluter Basis stopfen können (vgl. Abschnitt 2.3.1), durchgeführt. Geht das  $NL$  eines Sektors zu einem gewissen Zeitpunkt über den Grenzwert  $NL_{max}$  hinaus, wird ein Notstopfeingriff auf dem Sektor durchgeführt (korrektive Stopfung). Dafür wird eine einfachere Stopfmaschine eingesetzt, die das Gleis nur im Bezug auf seine eigene Achse richtet (vgl. Abschnitt 2.3.1). Korrektive Eingriffe sind also sehr ineffizient, da i. d. R. nur ein Sektor pro Nacht gestopft wird, namentlich der Sektor wo  $NL$  zu hoch ist.

In der Absicht die Anzahl der korrektiven Stopfarbeiten möglichst gering zu halten wird versucht, die Stopfkampagnen so zu planen, dass die Gesamtkosten bis zur nächsten Kampagne minimiert werden. Dafür muss der Bezug  $k_{Korr/Prv}$  zwischen den Kosten eines korrektiven und eines präventiven Eingriffs ermittelt werden. Dieser Bezug kann von Betreiber zu Betreiber sehr variieren. Deshalb werden in dieser Fallstudie verschiedene Werte von  $k_{Korr/Prv}$  in Betracht gezogen.

Die Kosten pro Nacht sind für die korrektiven Eingriffe niedriger, weil es sich um eine einfachere, langsamere Maschine handelt. Jedoch sind die Kosten pro gestopften Sektor bei der präventiven Stopfung viel niedriger, weil die korrektive Stopfung nur punktuell in den bedürftigen Sektoren durchgeführt wird (i. d. R. nur ein Sektor pro Nacht), während bei den präventiven Eingriffen im Durchschnitt ca. 20 Sektoren pro Nacht gestopft werden können. Die jährlichen Gesamtkosten der Stopfarbeiten  $K_{Jahr}$  können also anhand von Gl. 5.23 ermittelt werden.

$$K_{Jahr} = Np \cdot K_{Präv} + Nk \cdot K_{Korr} \quad (5.23)$$

mit

- $K_{Jahr}$  : Gesamte jährliche Kosten der Stopfeingriffe
- $K_{Präv}$  : Kosten eines präventiven Stopfeingriffs
- $K_{Korr}$  : Kosten eines korrektiven Stopfeingriffs
- $Np$  : Anzahl der präventiven Stopfeingriffe
- $Nk$  : Anzahl der korrektiven Stopfeingriffe

Anhand der Planungsmethode von Abschnitt 5.2, des Prozessmodells von Kapitel 3 und der Prognosemethode von Kapitel 4 kann für jede Anzahl von präventiven Eingriffen die Anzahl von erforderlichen korrektiven Eingriffen ermittelt werden. Der Vorgang kann wie folgt beschrieben werden:

1. Ist ein Szenario (d. h. Netztopologie und aktuelle Messreihen von  $NL$  auf jedem Sektor) definiert, wird die optimale Eingriffsplanung mit jedem  $Np \in 1, \dots, Np_{max}$  Eingriffen ermittelt, wobei  $Np_{max}$  die Anzahl von präventiven Eingriffen ist bei denen die Anzahl von erforderlichen korrektiven Eingriffen gleich null wäre.
2. Für jeden zu stopfenden Sektor wird sein  $NL$  nach der Stopfung mit dem Alterungs- und Instandsetzungsmodell von Kapitel 3 geschätzt.
3. Für jeden Sektor wird der  $\widehat{NL}(t + 1 \text{ Jahr})$  anhand des Prognoseverfahrens von Kapitel 4 ermittelt. Die Anzahl der im Laufe des nächsten Jahres erforderlichen

korrektiven Einsätze entspricht der Anzahl der Sektoren, deren  $\widehat{NL}(t + 1 \text{ Jahr})$  größer als der zulässige Grenzwert  $NL_{max}$  ist.

4. Zuletzt werden anhand von Gl. 5.23 die entstehenden jährlichen Stopfungskosten kalkuliert.

Mittels dieses Verfahrens kann die im Sinne der jährlichen Kosten optimale Anzahl von präventiven Eingriffen  $Np_{opt}$  ermittelt werden.

In diesem Abschnitt wird die Aufgabe gestellt, für das in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Szenario die optimale Anzahl von korrektiven Eingriffen  $Np_{opt}$  zu finden, d. h. die  $Np$ , welche die Gesamtkosten  $K_{Jahr}$  nach Gl. 5.23 minimiert. Die Zielsetzung besteht darin, unter Einhaltung der zulässigen Gleisqualität für minimale Gesamtkosten ein ausgewogenes Verhältnis von korrektiven und präventiven Eingriffen zu ermitteln.

Da an dieser Stelle eine Minimierung der jährlichen Kosten erzielt wird, wird eine neue Gütefunktion benutzt, nämlich die von Gl. 5.24. Insofern beträgt die Güte bei Sektoren, deren prognostizierte  $NL$  über  $NL_{max}$  hinaus geht, 1,0; bei den restlichen Sektoren  $\widehat{NL}(t + 1 \text{ Jahr}) - NL_{max}$ , welches ein negativer Wert sein wird, und als Strafe für die zu frühe Stopfung gilt. So wird jeweils die Planung ermittelt, die den Erwartungswert der korrektiven Eingriffe minimiert.

$$G(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \widehat{NL}_{t+1 \text{ Jahr}} > NL_{max}, \\ \widehat{NL}_{t+1 \text{ Jahr}} - NL_{max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.24)$$

Durch Anwendung des heuristischen Algorithmus von Abschnitt 5.3.1 wird die Anzahl der erforderlichen korrektiven Eingriffe  $Nk(Np)$  für jede Anzahl von präventiven Eingriffen  $Np \in \{1, \dots, 30\}$  ermittelt. Das Ergebnis wird in Abb. 5.4 vorgestellt. Am Anfang nimmt  $Nk$  sehr schnell ab, weil jeder weitere präventive Eingriff viele weitere potenziell ausfallende Sektoren abdecken kann. Wenn  $Np$  wächst, werden die von den präventiven Eingriffen noch nicht abgedeckten potenziell ausfallenden Sektoren immer weniger, und da sie im ganzen Schienennetz gestreut sind, wird die Wirkung weiterer präventiver Eingriffe immer kleiner.

Dieser Zusammenhang führt zur Feststellung, dass die Gesamtanzahl von Eingriffen  $Nk + Np$  mit  $Nk$  zuwächst. Mehr Stopfeingriffe bedeuten mehr Rampen (vgl. Annahme 6 in Abschnitt 5.2.1). Zudem wird durch korrektives Stopfen eine bessere Gleisgeometriequalität erreicht als mit präventivem Stopfen. Beide Erkenntnisse müssen den Kosten der korrektiven Eingriffe  $k_{Korr}$  angerechnet und daraufhin bei der Ermittlung des Kostenverhältnisses  $k_{Korr/Präv}$  mitberücksichtigt werden.

Da  $k_{Korr/Präv}$  für verschiedene Szenarios sehr unterschiedliche Werte betragen kann, werden die entstehenden Gesamtkosten bezogen auf die Kosten eines korrektiven Stopfeingriffes für vier verschiedene  $k_{Korr/Präv}$  ermittelt: 1,0, 0,75, 0,66 und 0,5. Die erreichten Ergebnisse werden in Abb. 5.5 dargestellt.

Bei  $k_{Korr/Präv} = 1,0$  ist es optimal, nur 26 präventive Eingriffe durchzuführen. Wenn  $k_{Korr/Präv}$  sich verringert, nimmt die Anzahl der optimalen korrektiven Eingriffe zu. Also besitzt die optimale Lösung bei  $k_{Korr/Präv} = 1,0$  25 korrektive bzw. einen präventi-



ven, bei  $k_{Korr/Präv} = 0,66$  zehn präventive bzw. 25 korrektive und bei  $k_{Korr/Präv} = 0,5$  acht präventive bzw. 29 korrektive Eingriffe.

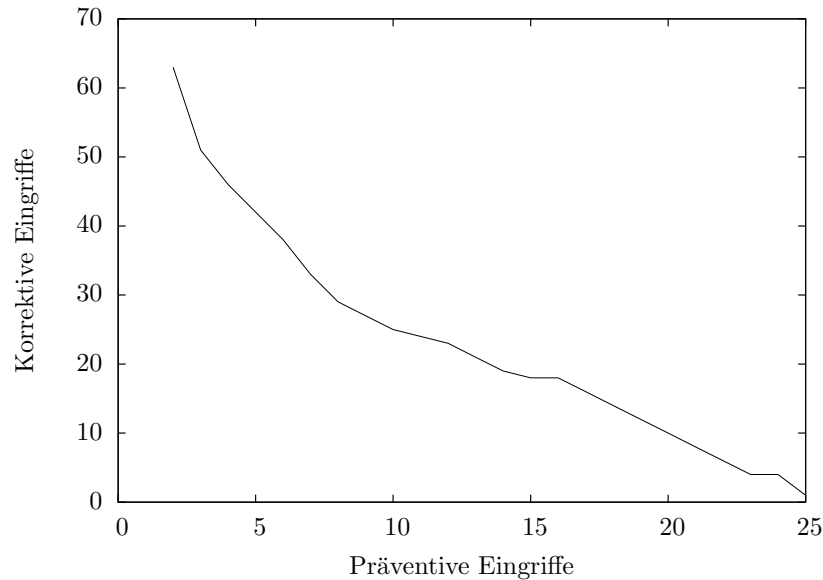


Abbildung 5.4: Korrektive Stopfeingriffe als Funktion der präventiven Stopfeingriffe

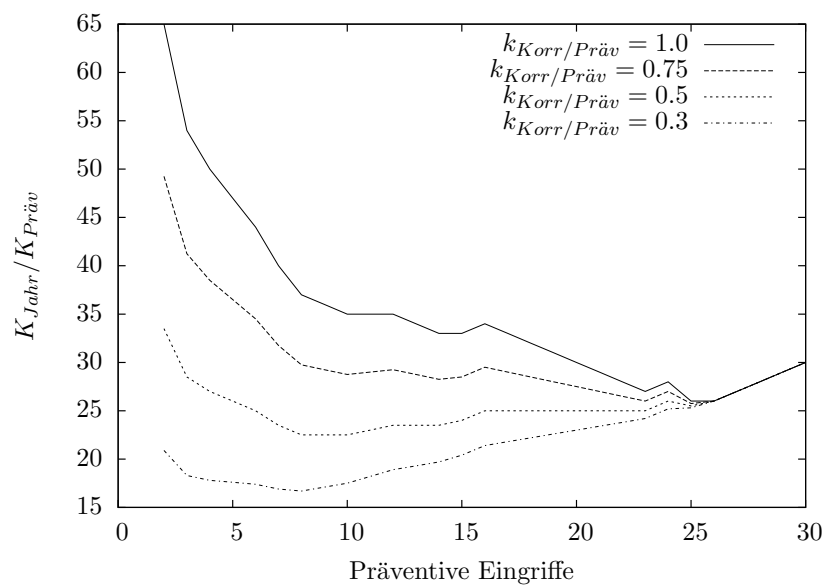


Abbildung 5.5: Jährliche Gesamtkosten der Stopfung (bezogen auf die Kosten eines präventiven Stopfeingriffes) als Funktion der Anzahl der präventiven Stopfeingriffe, bezogen auf die Kosten eines korrektiven Stopfeingriffes

## 5.5 Ausblick

In diesem Kapitel wurde eine heuristische Methode zur Planung von Gleisstopfeingriffen präsentiert. Es handelt sich hierbei um einen erheblich innovativen Ansatz, der über den Stand der Technik hinausgeht, indem er sowohl die Präzision und Realitätsnähe der berechneten Eingriffspläne als auch die Reduktion der Berechnungsdauer deutlich verbessert. Dies ermöglicht es, die Instandhaltungsstrategie zu verfeinern, indem die Vor- bzw. Nachteile der potentiellen Modifikationen im Instandhaltungsprozess in annehmbarer Rechenzeiten ermittelt werden können.

Zudem wurde anhand zweier Fallstudien die Anwendbarkeit der Methode sowohl für die Ermittlung der optimalen Eingriffsplanung als auch für die Optimierung der jährlichen Gesamtkosten der Stopfarbeiten bestätigt.

In Kapitel 6 wird die hiermit eingeführte Planungsmethode in einer Monte Carlo Simulationsumgebung für die ganzheitliche Optimierung der Instandhaltungsstrategien der Gleisgeometrie eingebunden.

## Kapitel 6

# Ganzheitliche Optimierung der Instandhaltungsstrategie

### 6.1 Einleitung

Im Eisenbahnwesen ist eine Nutzungsdauer von über 30 Jahre üblich [VEIT, 2007a, S. 873] [HOLZFEIND et al., 2009]. Das zeugt von der Wichtigkeit der Bestimmung einer optimierten langfristigen Instandhaltungsstrategie.

In den vorherigen Kapiteln wurde auf die Einzelbausteine des in Abb. 1.2 vorgestellten Prozessmodells individuell eingegangen. In diesem Kapitel wird ein Simulationsverfahren für die gesamte Nutzungsdauer des Systems Gleis eingeführt. Für die Gestaltung der Simulationsumgebung sind diese zuvor benannten Bausteine erforderlich. Ihr Ziel ist die Simulation und Auswertung verschiedener Instandhaltungsstrategien während des ganzen Lebenszyklus des Gleises unter Betrachtung des Alterungs- und Instandsetzungsmodells jedes Gleissektors und der für die Instandhaltungsmaßnahmen verfügbaren Ressourcen.

In Abschnitt 6.2 werden das Verfahren beschrieben und die Eingangs- bzw. Ausgangsdaten einer Simulation spezifiziert. Abschnitt 6.3 stellt eine Fallstudie vor, wo zwei Instandhaltungsstrategien simuliert, ausgewertet und mittels paarweisen Vergleich einander gegenübergestellt werden.

### 6.2 Simulationsverfahren zur ganzheitlichen Auswertung von Instandhaltungsstrategien

Dieser Abschnitt gibt eine Beschreibung der für die Durchführung einer die gesamten Nutzungsdauer umfassenden Simulation erforderlichen Eingangsdaten, des Simulationsablaufs, sowie der dadurch generierten Ausgangsdaten.

### 6.2.1 Eingangsdaten

Voraussetzung für die Realisierung einer Simulation sind folgende Daten:

- Die Netztopologie inklusive Depots, d. h. Nebengleise wo Stopfmaschinen abgestellt werden können.
- Ein Alterungs- und Instandsetzungsmodell der Gleisgeometrie nach Abschnitt 3.2 für jeden Gleissektor.
- Der täglich für Instandhaltungseingriffe verfügbare Zeitraum.
- Der Zeitabstand  $h$  zwischen Stopfkampagnen, typischerweise sechs oder zwölf Monate.
- Vor bzw. nach jedem Eingriff erforderliche Auf- bzw. Abrüstungszeiten.
- Fahr- und Stopfgeschwindigkeit der verfügbaren Stopfmaschinen.
- Der maximal anzunehmende Längshöhenfehler  $NL_{max}$ , im Folgenden als Eingriffsschwelle bezeichnet, d. h. der Wert von Längshöhenfehlern vor dessen Erreichung ein Stopfeingriff stattfinden muss. Dieser kann entweder ein fixer Wert sein oder von anderen Systemparameter abhängen wie in [VEIT, 2007b] angedeutet von z. B. der Zeit seit der Neulage oder der Anzahl akkumulierter Stopfeingriffe, abhängen.
- Eine Gütefunktion  $G(\widehat{NL}(t+h), t)$  nach Abschnitt 5.2.2. Sie sagt aus, wie viel es wert ist, das Stopfen eines gewissen Gleissektors zur Zeit  $t$  vorzunehmen, unter Berücksichtigung des zur Zeit der nächsten Stopfkampagne prognostizierten  $NL(t)$ , sprich  $\widehat{NL}(t+h)$ .

Davon ist aufgrund seiner Komplexität das Alterungs- und Instandsetzungsmodell das schwierigst zu ermittelnde, vgl. Kapitel 3. Dieses kann wie in Abschnitt 3.4 aus Messreihen gewonnen werden oder wie in [MEIER-HIRMER et al., 2006] basierend auf Merkmalen jedes Sektors erfolgen. Um realistische Simulationen zu erzielen ist es entscheidend dabei genügende Merkmale zu berücksichtigen, so dass möglichst viele verschiedene Modellparametrierungen erfolgen können.

### 6.2.2 Simulationsablauf

Abb. 6.1 zeigt den schematischen Ablauf der Simulation. Dieser kann durch folgende Schritte geschildert werden:

1. Die Simulationszeit  $t$  auf Null setzen.
2.  $t$  um  $h$ , die Periode der Stopfkampagnen, inkrementieren.

3. Den Verlauf der Gleislage bis zur Zeit  $t$  für jeden Gleissektor mittels des in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Monte Carlo Verfahrens simulieren.
4. Prognosen für den Längshöhenfehler jedes Sektors für die Zeit der nächsten Stopfkampagne anhand der hybriden Prognosemethode von Abschnitt 4.3.6 erstellen.
5. **Wenn** Instandhaltungsbedarf besteht, d. h. der Längshöhenfehler von einem oder mehreren Gleissektoren werden laut Prognose bis zur nächsten Stopfkampagne den vorgegebenen maximalen annehmbaren Längshöhenfehler überschreiten, **dann**  $N$  auf eins setzen und weiter zum nächsten Schritt, **ansonsten** zurück zum Schritt 2.
6. Die optimale Stopfkampagne  $P$  mit  $N$  Stopfeingriffen ermitteln.
7. **Wenn**  $P$  den ganzen Instandhaltungsbedarf deckt, d. h. sie beinhaltet alle Gleissektoren deren Längshöhenfehlerprognose größer ist als der vorgegebene maximale Wert, **dann** weiter mit dem nächsten Schritt, **ansonsten**  $N$  um eins inkrementieren und zurück zum Schritt 6.
8. Die geplante Stopfkampagne  $P$  wird durchgeführt.
9. **Wenn** der vorgegebene Simulationsendzustand (z. B. die Simulationszeit  $t$  hat einen gewissen Wert erreicht) erreicht wurde, **dann** die Simulation abschließen, **ansonsten** zurück zum Schritt 2.

### 6.2.3 Ausgangsdaten

Die Ergebnisse einer Simulation sind zum einen

- eine Liste von Stopfkampagnen (z. B. bei einer Kampagnenperiodizität von einem Jahr und einer gesamten Simulationszeit von 20 Jahren würden sich eben 20 Stopfkampagnen ergeben) und zum anderen
- für jeden Gleissektor der simulierte zeitliche Verlauf von  $NL$  während der ganzen Simulationszeit sowie die durchgeführten Stopfeingriffe.

Anhand dieser Daten können wesentliche Merkmale des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie, wie z. B. durchschnittliche Längshöhenfehler und gesamter Instandhaltungsaufwand, ausgewertet werden.

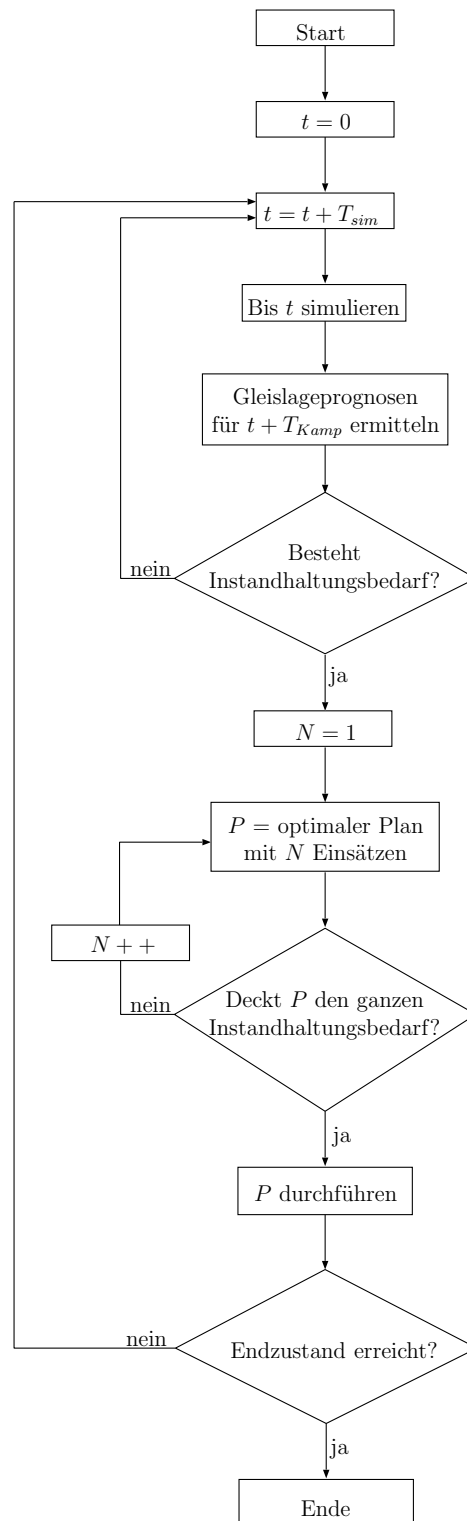


Abbildung 6.1: Flussdiagramm des Simulationsablaufs.  $t$  ist die Simulationszeit,  $T_{sim}$  der Simulationsschritt und  $h$  die Zeit zwischen Stopfkampagnen.

### 6.2.4 Ausblick

Dieses Simulationsverfahren bietet die Möglichkeit an, die Wirkung beliebiger Änderungen in den Eingangsdaten auf die Ergebnisse des Instandhaltungsprozesses, d. h. auf die Qualität der Gleisgeometrie, einzuschätzen. So können aus der Liste der Eingangsdaten viele *Stellschrauben* identifiziert werden, u. a.

- die Gütefunktion,
- die Eingriffsschwelle,
- die Fahr- und Stopfgeschwindigkeit der Stopfmaschinen und
- die für die Stopfarbeiten verfügbare Zeit.

Damit stellt das Verfahren eine sehr leistungsfähige Basis für die Instandhaltungsstrategieoptimierung dar.

In der Folge wird dieses Verfahren exemplarisch für die Simulation und Auswertung zweier Instandhaltungsstrategien angewendet.

## 6.3 Fallstudie

Zum Zweck der Validierung des in Abschnitt 6.2 dargestellten Simulationsverfahrens wird sie hiermit für die Auswertung zweier Instandhaltungsstrategien angewendet.

### 6.3.1 Szenario

Dafür wird das Szenario aus Abschnitt 5.4.1 verwendet. Doch im Gegensatz zur Fallstudie von Abschnitt 5.4 wird hier nicht nur eine Stopfkampagne ermittelt, sondern der Alterungs- und Instandsetzungsprozess für 25 Jahre simuliert. Dafür ist für jeden Gleis-sektor ein Alterungs- und Instandsetzungsmodell der Gleisgeometrie nach Abschnitt 3.2 notwendig. In dieser Fallstudie werden die Modelle verwendet, die in Abschnitt 3.5.1 auf Basis einer Datenbank mit gleisgeometrischen Messwerten einer TGV-Strecke durch Clusteranalyse ermittelt wurden. So wird jedem Sektor eines der in Abschnitt 3.5.1 25 identifizierten Alterungs- und Instandsetzungsmodelle zugewiesen und zwar in der gleichen Reihenfolge wie sie sich auf der realen Strecke befinden.

Der maximal anzunehmende Längshöhenfehler  $NL_{max}$  beträgt 1,0 und die Periodizität der Stopfkampagne  $h$  ein Jahr.

Die benutzte Gütefunktion  $G(t)$  wird von Gl. 6.1 bestimmt, wo die Eingriffs- und Warnungsschwelle sowohl Konstanten als auch Funktionen der Zeit sein können.

$$G(\widehat{NL}(t+h), t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \widehat{NL}_{(t+h)} > ES(t) \\ 0,01 & \text{if } ES(t) > \widehat{NL}_{(t+h)} > WS(t) \\ -0,01 & \text{if } \widehat{NL}_{(t+h)} < WS(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

mit

$\widehat{NL}_{(t+h)}$  : 1 Jahr im Voraus Prognose von  $NL(t)$   
 $ES(t)$  : Eingriffsschwelle  
 $WS(t)$  : Warnungsschwelle

Anhand von Gl. 6.1 können also drei Zonen definiert werden:

1. Eingriffszone:  $\widehat{NL}_{(t+h)} > ES(t)$ . Sektoren im Eingriffsbereich werden als dringend instandhaltungsbedürftig betrachtet, da sie ohne Stopfen im Laufe des nächsten Jahres den maximalen annehmbaren Längshöhenfehler  $NL_{max}$  erreichen würden. Da das Ziel der für die Optimierung der Stopfpläne zuständigen Heuristik die Maximierung der Güte der im Stopfplan inbegriffenen Sektoren ist (vgl. Gl. 5.6), wird sie bei der Suche eines optimalen Stopfplans zunächst die Sektoren in der *Eingriffszone* aufgrund ihrer hohen Güte (nämlich 1, vgl. Gl. 6.1) priorisieren.
2. Warnungszone:  $ES(t) > \widehat{NL}_{(t+h)} > WS(t)$ . Sektoren in der Warnungszone werden als nicht dringend instandhaltungsbedürftige Sektoren betrachtet, weshalb sie nach Gl. 6.1 eine Güte von lediglich 0,01 zugewiesen bekommen. Sie werden also nur dann im Stopfplan berücksichtigt, wenn ihr Einschluss in den Stopfplan keinen Ausschluss eines Sektors im Eingriffsbereich impliziert.
3. Zielzone:  $\widehat{NL}_{(t+h)} < WS(t)$ . Zuletzt werden Sektoren in der Zielzone als nicht instandhaltungsbedürftig betrachtet. Im Gegenteil; eine zu frühe Stopfung führt zu einer Verkürzung des Lebenszyklus (vgl. Abschnitt 3.4). Deswegen wird ihnen eine negative Güte zugewiesen. Daraufhin wird ein Sektor in der Zielzone nur dann im Stopfplan eingeschlossen wenn dadurch der Einschluss von Sektoren in den Eingriffs- bzw. Warnungszone ermöglicht wird.

### 6.3.2 Betrachtete Instandhaltungsstrategien

In [VEIT, 2007a, S. 911] wird die Eingriffsschwelle als eine für die Feinabstimmung von Strategien gut geeignete Stellschraube identifiziert. Zudem wird angedeutet, dass sich eine zum gleisgeometrischen Fehler konforme Eingriffsschwelle als wirtschaftlicher darstellt als eine konstante Eingriffsschwelle. Allerdings setzt eine solche Feinabstimmung die Kenntnis des den realen Alterungs- und Instandsetzungsprozess beschreibenden Modells voraus. Insofern erweist sich das in Abschnitt 6.2 dargestellte Simulationsverfahren für die Auswertung einer Instandhaltungsstrategie mit konformer Eingriffsschwelle als adäquat.



Also werden in dieser Fallstudie zwei Strategien in Betracht gezogen, die sich nach ihren Eingriffs- und Warnungsschwellen voneinander unterscheiden. In der Strategie 1 ist die Eingriffsschwelle konstant auf 1,0 gesetzt und die Warnungsschwelle variiert zwischen 0,6 am Anfang der Simulation und 1,0 am Ende (s. Abb. 6.2(a)). Im Gegensatz ist bei der Strategie 2 die Warnungsschwelle konstant auf 0,6 gesetzt und die Eingriffsschwelle variiert zwischen 0,6 am Anfang und 1,0 am Ende (s. Abb. 6.2(b)).

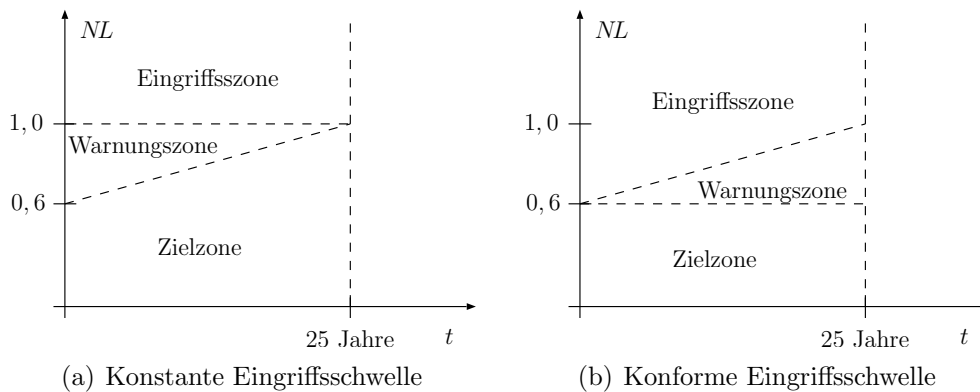


Abbildung 6.2: Eingriffs- und Warnungsschwellen der betrachteten Instandhaltungsstrategien

Mit der Strategie 1 wird also bei jeder Kampagne jeder Sektor gestopft, dessen Längshöhenfehlerprognose  $\widehat{NL}_{(t+1 \text{ Jahr})}$  über 1,0 hinaus geht. Mit der Strategie 2 wird dagegen bei jeder Kampagne jeder Sektor gestopft, dessen  $\widehat{NL}_{(t+1 \text{ Jahr})}$  über die konforme Eingriffsschwelle hinaus geht. Also werden Sektoren bei Strategie 2 im Allgemeinen früher gestopft als bei Strategie 1. Dies sollte zur Folge haben, dass Strategie 1 zwar einen geringeren Instandhaltungsaufwand, aber dafür eine im Durchschnitt geringere Gleisqualität, mit sich bringt.

### 6.3.3 Auswahl der für die Auswertung der Instandhaltungsstrategien relevanten Merkmale der Simulationsergebnisse

Die Simulation des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie liefert große Datenmengen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Deshalb ist eine Verarbeitung dieser Daten für die Auswertung der verschiedenen zu simulierenden Strategien erforderlich.

Für die Analyse einer Instandhaltungsstrategie muss entschieden werden, welche ihrer Eigenschaften, Merkmale und Größen für ihre Auswertung in Betracht bezogen werden. In dieser Fallstudie werden die in Abb. 6.3 aufgelisteten Eigenschaften, Merkmale und Größen gewählt. Die zwei wichtigsten Eigenschaften der Instandhaltungsstrategie sind ihr Aufwand und ihr Ergebnis, d. h. die im Laufe der Nutzungsdauer erreichte Gleislage. Vom Aufwand sind zwei Eigenschaften von hoher Bedeutung: die monetären Kosten, welche anhand der gesamten Anzahl von Eingriffen ausgedrückt werden, und seine

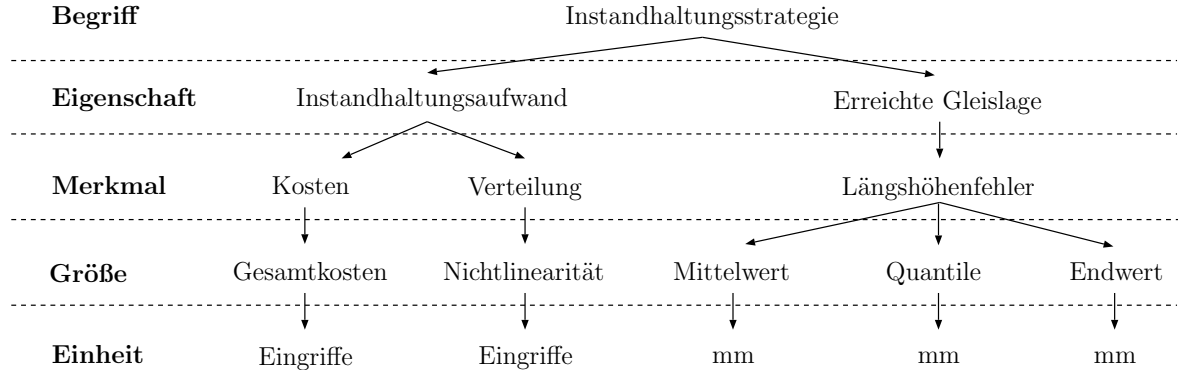


Abbildung 6.3: Für ihre Auswertung berücksichtigte Eigenschaften, Merkmale und Größen einer Instandhaltungsstrategie (basierend auf [SCHNIEDER, 2009])

zeitliche Verteilung. Die letztere wird durch die Nichtlinearität seiner Zeitverteilung gemessen. Eine lineare Verteilung des Aufwands wird bevorzugt, da ihre Schwankungen die Planbarkeit der Aufgaben sehr beeinträchtigt. Dies wird in den Ergebnissen dieser Fallstudie (s. Abschnitt 6.3.4) verdeutlicht.

Bei der Gleislage sind mehrere Merkmale von Bedeutung, jedoch wird im Rahmen dieser Arbeit der Längshöhenfehler  $NL$  als Merkmal der allgemeinen Gleisgeometriefehler angenommen. Eine Begründung dieser Annahme sowie eine Beschreibung der verschiedenen Merkmale der Gleisgeometrie befinden sich in Abschnitt 2.2.

Sei  $NL_i(t)$  der simulierte Wert vom Längshöhenfehler  $NL$  zum Zeitpunkt  $t$  im Gleis-sektor  $i$ . Dann sei  $\mu_{NL}(t)$  wie in Gl. 6.2 bestimmt der Mittelwert der  $NL$  aller Sektoren zur Zeit  $t$  und seine Varianz  $\sigma_{NL}^2(t)$  wie in Gl. 6.3 bestimmt.

$$\mu_{NL}(t) = \frac{1}{N_{Sek}} \sum_{i=1}^{N_{Sek}} NL_i(t) \quad (6.2)$$

$$\sigma_{NL}(t) = \frac{1}{N_{Sek}} \sum_{i=1}^{N_{Sek}} (NL_i(t) - \mu_{NL}(t))^2 \quad (6.3)$$

mit

$N_{Sek}$  : Gesamtanzahl der Sektoren des simulierten Netztes

Dann sind die vom Längshöhenfehler berücksichtigten Größen

- $\mu_{NL}$  und  $\sigma_{NL}^2$ . Der Mittelwert aller  $\mu_{NL_i}$  wie in Gl. 6.4 und der Mittelwert der Varianzen  $\sigma_{NL_i}^2$  wie in Gl. 6.5.

$$\mu_{NL} = \frac{1}{N_{Schritt}} \sum_{t=0}^{t_{End}} \mu_{NL}(t) \quad (6.4)$$

$$\sigma_{NL}^2 = \frac{1}{N_{Schritt}} \sum_{t=0}^{t_{End}} \sigma_{NL}(t) \quad (6.5)$$

mit

$N_{Schritt}$  : Gesamtanzahl der Simulationsschritte  
 $t_{End}$  : Endzeit der Simulation

- $\mu_{NL}(t = t_{End})$  und  $\sigma_{NL}(t = t_{End})$ . Der Mittelwert  $\mu_{NL}(t)$  und die Varianz  $\sigma_{NL}^2(t)$ , wie in Gl. 6.2 bzw. Gl. 6.3 bestimmt, zum Endzeitpunkt der Simulation.
- 0,1- und 0,9-Quantile.  $p$ -Quantile sind „...ein Lagemaß in der Statistik, wobei  $p$  eine reelle Zahl zwischen 0 und 1 ist. Das  $p$ -Quantil ist ein Merkmalswert, der die Verteilung einer Variablen bzw. Zufallsvariablen in zwei Abschnitte unterteilt. Links vom  $p$ -Quantil liegen  $100 \cdot p$  Prozent aller Beobachtungswerte bzw.  $100 \cdot p$  Prozent der Gesamtzahl der Zufallswerte...“ [WIKIPEDIA, 2011b]. Also ist das  $p$ -Quantil  $Q_p(t)$  im Rahmen dieser Studie der Wert für den das gilt, dass  $100 \cdot p$  Prozent der Sektoren einen  $NL(t)$  aufweisen der kleiner als  $Q_p(t)$  ist. In dieser Fallstudie werden die Mittel- und Endwerte der Quantile betrachtet.

### 6.3.4 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation der in Abschnitt 6.3.2 dargestellten Instandhaltungsstrategien präsentiert. Dabei werden das in Abschnitt 6.2 vorgestellte Simulationsverfahren und das in Abschnitt 6.3.1 beschriebene Szenario angewendet.

In Abb. 6.4 wird der Instandhaltungsaufwand anhand der Anzahl der jeder jährlichen Stopfkampagne zugewiesenen Stopfeinsätze gezeigt. In den ersten elf Jahren werden bei keiner der Strategien Eingriffe durchgeführt. Mit der Strategie der konformen Eingriffsschwelle (ES) (vgl. Abschnitt 6.3.2) findet die erste Stopfkampagne schon im zwölften Jahr, mit der Strategie der konstanten ES erst im dreizehnten statt. Der Gesamtaufwand bei der konstanten ES Strategie scheint erheblich niedriger zu sein, jedoch weist die Kurve der konformen ES viel weniger Schwankungen auf, d. h. sie ist viel linearer als die der konstanten ES.

Abb. zeigt den Mittelwert und Abb. die Streuung des Längshöhenfehlers der 1200 Gleis-sektoren während der Simulationdauer von 25 Jahren mit konstanter und konformer ES. Bis zum Jahr 11 weichen beide Strategien nicht ab, also verläuft auch der Längshöhenfehler in beiden Fällen identisch. Da die konforme ES immer niedriger ist als die konstante, wird mit der konformen ES früher eingegriffen. Dies hat zur Folge dass der

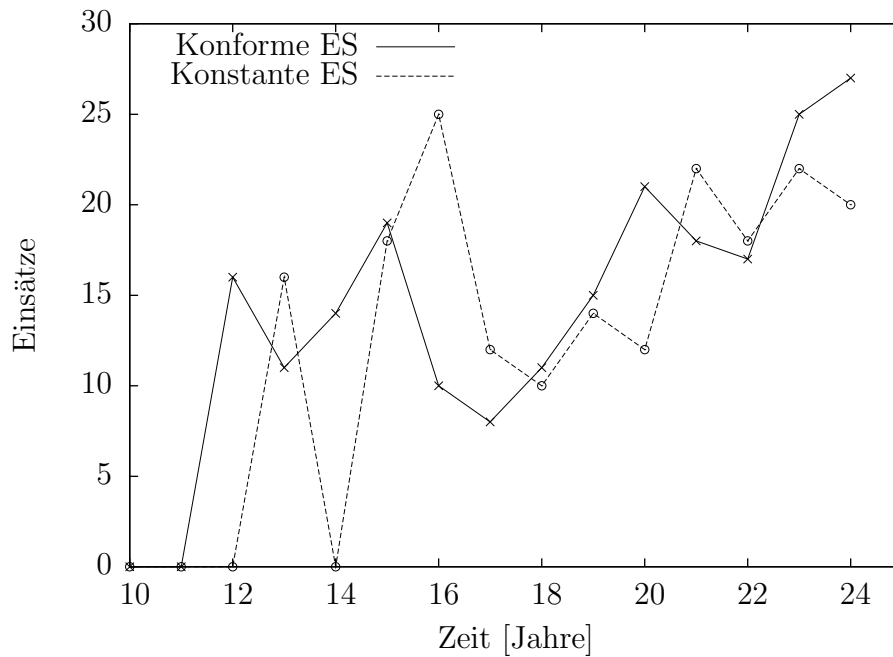
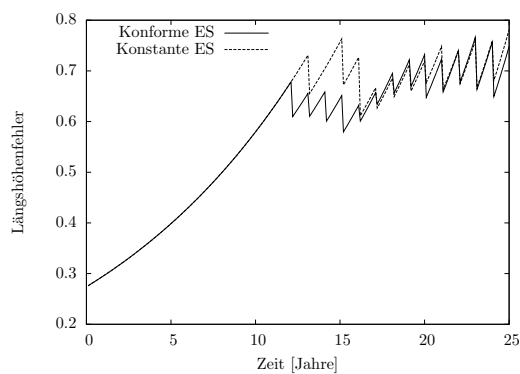
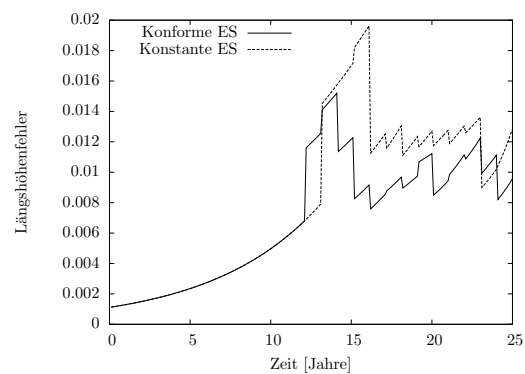


Abbildung 6.4: Anzahl der jeder jährlichen Stopfkampagne zugewiesenen Stopfeinsätze

Mittelwert des Längshöhenfehlers zwischen den Jahren 12 und 16 mit der konstanten ES Strategie wesentlich höher ist als mit der konformen ES. Danach ist der Unterschied unerheblich. Ein größerer Unterschied wird bei der Streuung beobachtet, die zwischen den Jahren 13 und 25 bis auf das Jahr 23 immer bei der konformen ES erheblich kleiner ist.



(a) Mittelwert



(b) Streuung

Abbildung 6.5: Mittelwert und Streuung des Längshöhenfehlers der 1200 Gleissektoren für die simulierte Dauer von 25 Jahren

Das 0,10-Quantil (die  $NL$  unterhalb dessen nur 10% der Sektoren sind) und das 0,90-Quantil (die  $NL$  oberhalb dessen nur 10% der Sektoren sind) werden in Abb. 6.6 dargestellt. Auch hier ist die Abweichung zwischen den Kurven besonders zwischen den Jahren 12 und 16 merkwürdig, zugunsten der konformen ES. Das 0,90-Quantil ist repräsentativ für die *schlechteren* Sektoren, d. h. Sektoren die schon lange nicht mehr gestopft wurden. Das 0,10-Quantil ist im Gegenteil repräsentativ für die frisch gestopften Sektoren unter denen die Abweichung nach dem Instandsetzungsmodell von Abschnitt 3.4.3 i. d. R. nicht so groß ist (vgl. Abb. 3.4). Zudem ist das Anwachsen des Längshöhenfehlers exponentiell was dazu führt, dass die  $NL$  Abweichungen zwischen Sektoren im Laufe der Zeit tendenziell größer werden, solange keine Stopfung stattfindet. Deshalb ist die Abweichung zwischen konformer und konstanter ES beim 0,90-Quantil größer als beim 0,10-Quantil.

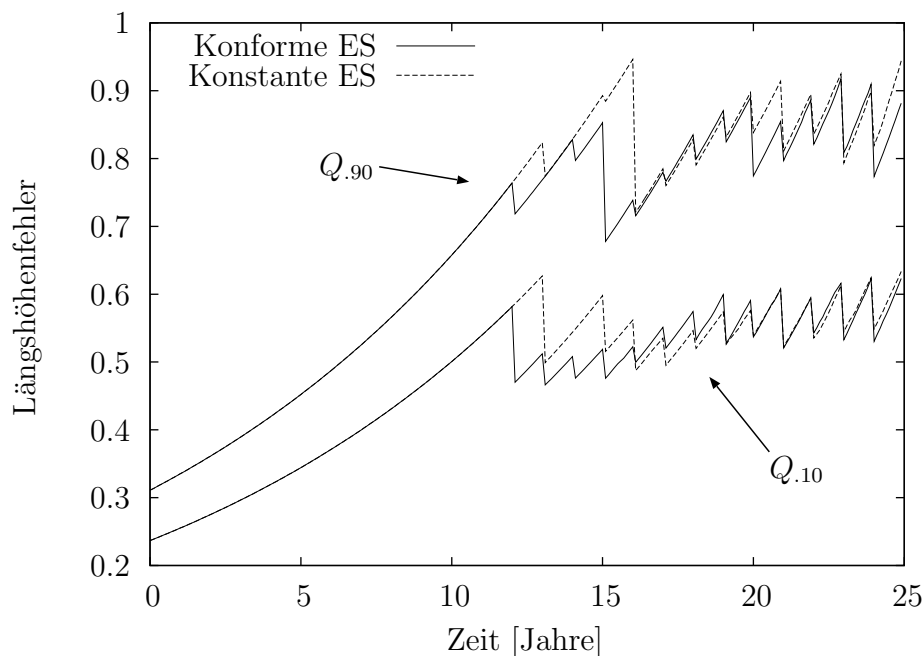


Abbildung 6.6: 0,10- und 0,90-Quantile der Sektoren- $NL$  mit konstanter und konformer Eingriffsschwelle

Abb. 6.7 zeigt für die simulierte Nutzungsdauer von 25 Jahren die Anzahl von Gleissektoren deren Längshöhenfehler  $NL$  über verschiedenen Schwelle, 0,7; 0,8; 0,9 und 1,0, hinaus gehen. Hier verdeutlicht sich die mit der konformen Eingriffsschwelle erreichbare bessere Gleislage. Für die Schwellen 0,7 und 0,8 ist der Unterschied nur zwischen den Jahren 12 und 16 sichtbar, aber für die Schwellen 0,9 und 1,0 ist der Unterschied bis zum Ende der Simulation erheblich. Im Falle der konformen ES bleibt die Anzahl von Sektoren deren  $NL$  die Schwelle von 1,0 überschreitet unter 20, d. h. die  $NL$  fast aller Sektoren bleibt jederzeit unter 1,0; was eines der Ziele des Instandhaltungsprozesses ist

(vgl. Abschnitt 6.3.1). Hingegen erreicht bei der konstanten ES die Anzahl der Sektoren mit  $NL$  größer als 1,0 am Ende des 23. Jahres 170. Das liegt daran, dass die Prognosen nicht 100% genau sind, d. h. es kann vorkommen dass eine Prognose  $\widehat{NL}_{(t+1 \text{ Jahr})}$  geringfügig unter 1,0 aber der tatsächliche Wert  $NL_{(t+1 \text{ Jahr})}$  etwas über 1,0 liegt.

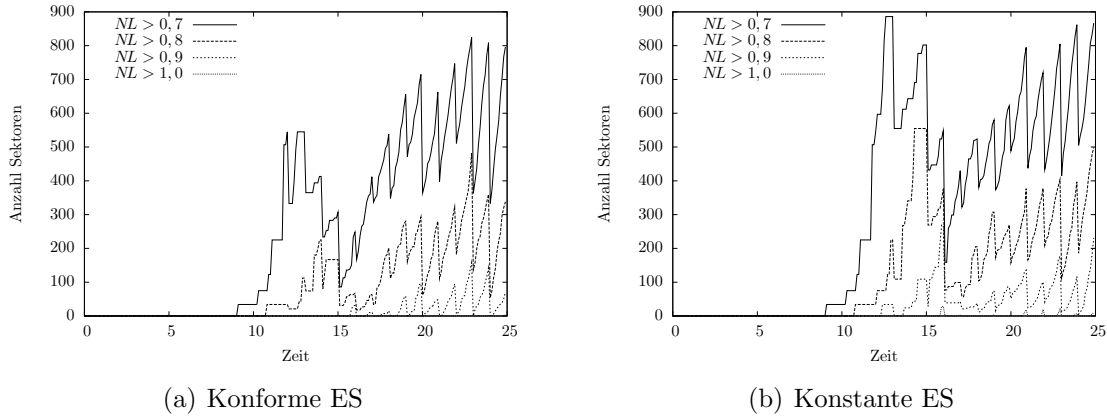


Abbildung 6.7: Anzahl der Gleissektoren deren  $NL$  während der 25 Jahre der Simulation größer als jeweils 0,7, 0,8, 0,9 und 1,0 ist

In Tabelle 6.1 werden die sich aus der Simulation ergebenden Werte der in Abschnitt 6.3.3 ausgewählten Merkmale präsentiert. Diese Werte fassen die in den Abbildungen 6.4 bis 6.7 präsentierten Ergebnisse zusammen. Nur bei den Kosten, welche hierin anhand der Gesamtzahl der während der simulierten Nutzdauer durchgeführten Stopfeingriffe ausgedrückt werden, ist die konstante-ES-Strategie besser als die konforme-ES-Strategie. Die relativen Abweichungen zwischen den Werten sind nur für die Merkmale Kosten, Nichtlinearität und die Streuungen vom Mittel- und Endwert von  $NL$  größer als 10%, während sie für die Mittelwerte 0,10- und 0,90-Quantile und für die Mittel- und Endwerte von  $NL$  weniger als 5% betragen.

Tabelle 6.1: Für die Auswertung der Instandhaltungsstrategien relevante Merkmale der Simulationsergebnisse

Merkmale	Konforme ES	Konstante ES	Relat. Abw. [%]
Kosten [Gesamteingriffe]	212	189	12,2
$\mu_{Q_{0,90}}$	0,661	0,678	-2,49
$\mu_{Q_{0,10}}$	0,464	0,473	-1,80
$\mu_{NL}$	0,559	0,574	-2,56
$\sigma_{NL}^2$	0,00686	0,00805	-14,7
$\mu_{NL_{end}}$	0,605	0,625	-3,21
$\sigma_{NL_{end}}^2$	0,00950	0,0127	-25,2
Nichtlinearität	7,81	9,56	-18,3

### 6.3.5 Methodischer Ansatz zur Auswertung der simulierten Instandhaltungsstrategien

In Abschnitt 6.3.3 sind die für die Auswertung einer Instandhaltungsstrategie ausgewählten Merkmale und in Tabelle 6.1 die anhand der Simulation unter Anwendung zwei verschiedener Instandhaltungsstrategien erreichten Werte, gelistet. Im Folgenden sind diese Ergebnisse zwecks der Einstufung der Strategien zu bewerten. Hierfür werden paarweise Vergleiche nach [DILL, 2000] herangezogen. Anhand dieses Ansatzes können Entscheidungen unter Berücksichtigung ihrer *a priori* unüberschaubaren Komplexitäten in eine Reihe paarweiser Vergleiche zerlegt werden. Vorteil dieses Ansatzes ist die durch den direkten Vergleich gewonnene Unterdrückung subjektiver Einflüsse.

Die Vorgehensweise besteht aus einer Kriterien- und einer Alternativenbewertung (vgl. Abb. 6.8). Bei der Alternativenbewertung werden die Kriterien einzeln miteinander verglichen woraus sich eine Rangordnung der Kriterien nach Bedeutung ergibt. Bei der Alternativenbewertung werden die Alternativen miteinander verglichen und dann die Punktesummierung jeder Einzelnen unter Berücksichtigung der relativen Bedeutung der Kriterien ermittelt.

Voraussetzung für die Zweckmäßigkeit des paarweisen Vergleichs ist, dass alle zu vergleichenden Strategien akzeptierbare Werte für alle relevanten Merkmale erweisen, d. h., dass der Instandhaltungsaufwand und die erreichte Gleislage innerhalb annehmbarer Grenzen liegen, sodass alle Strategien überhaupt durchführbar sind und daher derer Vergleich sinnvoll.

In Tabelle 6.2 befindet sich der für die Wichtung der berücksichtigten Merkmale durchgeführte paarweiser Vergleich. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass es sich lediglich um *eine* mögliche Auswertung handelt. In verschiedenen Szenarios können die paarweise Vergleiche sehr abweichen, z. B. die Kosten könnten als wichtiger als der Mittelwert  $\mu_{NL}$  bewerten werden.

Anhand der ermittelten relativen Bedeutungen können drei Gruppen identifiziert werden:

- Hohe Wichtigkeit:  $\mu_{NL}$
- Mittlere Wichtigkeit: Kosten,  $\mu_{NL_{end}}$ ,  $\mu_{Q_{0,90}}$ , Nichtlinearität,  $\sigma_{NL}^2$
- Niedrige Wichtigkeit:  $\sigma_{NL_{end}}^2$ ,  $\mu_{Q_{0,10}}$

Das wichtigste Merkmal ist mit Abstand der Mittelwert des Längshöhenfehlers  $\mu_{NL}$ . Beide den Instandhaltungsaufwand vertretenden Merkmale, nämlich die Kosten und die Nichtlinearität gehören der Gruppe mittlerer Wichtigkeit an.

Tabelle 6.3 zeigt die Gesamtbewertung beider Instandhaltungsstrategien unter Betrachtung der relativen Bedeutungen von Tabelle 6.2. Für jedes Merkmal wird jeder Strategie eine Zahl zwischen 4 und 0 zugeordnet, je nachdem ob der in der Simulation erreichte Wert (vgl. Tabelle 6.1) im Vergleich zu dem der anderen Strategie viel besser, mäßig besser, gleich, mäßig schlechter oder viel schlechter ist. Diese Zahl wird durch die relative Bedeutung des Merkmals (vgl. Tabelle 6.2) multipliziert woraus sich die gewichtete

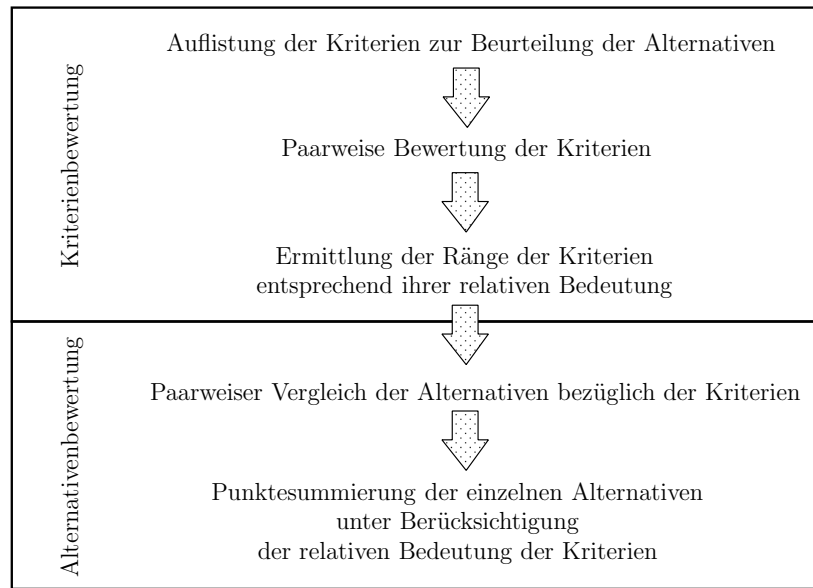


Abbildung 6.8: Vereinfachte Darstellung der paarweisen Vergleiche. Quelle: [DILL, 2000]

Tabelle 6.2: Paarweiser Vergleich zur Ermittlung der relativen Bedeutung der in Betracht gezogenen Merkmale der Instandhaltungsstrategien

Merkmale	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Zeilensumme	Relative Bedeutung	Rang
Kosten (I)	-	1	2	0	1	1	2	2	9	0,16	2
$\mu_{Q_{0,90}}$ (II)	1	-	2	0	1	1	1	2	8	0,14	4
$\mu_{Q_{0,10}}$ (III)	0	0	-	0	0	0	1	0	1	0,018	8
$\mu_{NL}$ (IV)	2	2	2	-	2	2	2	2	14	0,25	1
$\sigma_{NL}^2$ (V)	1	1	2	0	-	0	2	0	6	0,11	6
$\mu_{NL_{end}}$ (VI)	1	1	2	0	2	-	2	1	9	0,16	2
$\sigma_{NL_{end}}^2$ (VII)	0	1	1	0	0	0	-	0	2	0,036	7
Nichtlin. (VIII)	0	0	2	0	2	1	2	-	7	0,12	5
Summe									56	1,00	

Jedes Zeilenkriterium (A) wird jedem Spaltenkriterium (B) gegenübergestellt und hinsichtlich seiner Importanz bewertet:  
 2 → A wichtiger gegenüber B  
 1 → A und B gleichwertig  
 0 → A unwichtiger gegenüber B

Bewertung ergibt. Die Summierung der gewichteten Bewertungen entspricht der Gesamtsumme der Punkten jeder Strategie. Somit erhält die konforme-ES-Strategie den ersten Platz mit 2,768 Punkten, während die konstante-ES-Strategie nur 1,208 Punkten erzielt.



Tabelle 6.3: Paarweiser Vergleich zur Gesamtbewertung der zwei Instandhaltungsstrategien

Merkmale	Konforme ES	Konstante ES	Relative Bedeutung	Konforme ES (gewichtet)	Konstante ES (gewichtet)
Kosten (I)	0	4	0,16	0,0	0,64
$\mu_{Q_{0,90}}$ (II)	3	1	0,14	0,42	0,14
$\mu_{Q_{0,10}}$ (III)	3	1	0,018	0,054	0,018
$\mu_{NL}$ (IV)	3	1	0,25	0,75	0,25
$\sigma_{NL}^2$ (V)	4	0	0,11	0,44	0,0
$\mu_{NL_{end}}$ (VI)	3	1	0,16	0,48	0,16
$\sigma_{NL_{end}}^2$ (VII)	4	0	0,036	0,144	0,0
Nichtlin. (VIII)	4	0	0,12	0,48	0,0
Summe				2,768	1,208
Rang				1	2

In Spalten 1 und 2 wird jede Instandhaltungsstrategie (A) der anderen (B) gegenübergestellt und hinsichtlich des jeweiligen Merkmals bewertet:  
 4 → A viel besser als B  
 3 → A mäßig besser als B  
 2 → A und B gleichwertig  
 1 → A mäßig schlechter als B  
 0 → A viel schlechter als B

## 6.4 Ausblick

Das hiermit vorgestellte Verfahren ermöglicht die Simulation sowohl verschiedener Instandhaltungsstrategien (z. B. konstante oder konforme Eingriffsschwelle) als auch die Optimierung eines Parameters einer gegebenen Strategie (z. B. verschiedene Werte einer konstanten Eingriffsschwelle) auf die Gleislage sowohl der einzelnen Gleissektoren als auch auf dem ganzen betrachteten Gleisnetz. Es wurde deutlich, dass seine Durchführung nur anhand der Kombination des Alterungs- und Instandsetzungsmodells von Kapitel 3 mit dem Prognoseverfahren von Kapitel 4 und den Aufgabenplanungsverfahren von Kapitel 5 möglich (vgl. Abschnitt 6.2) ist.

Durch paarweisen Vergleich konnte eine Rangordnung der in Betrachtung gezogenen Strategien systematisch formuliert werden. Dieser Entscheidungsprozess kann in die folgenden drei Stufen aufgegliedert werden:

1. Auswahl der relevanten Merkmale
2. Vergleich und Rangordnung der Merkmale
3. Vergleich der Strategien bezogen auf die ermittelten relativen Bedeutungen der ausgewählten Merkmale

Obwohl die Methode an sich allgemeingültig ist, sind alle drei Stufen stark durch das spezifischen Szenario bedingt, d. h. für verschiedene Szenarios können die Gewichten der Merkmale (in Tabelle 6.3 als relative Bedeutungen benannt) verschiedene Werte annehmen und dadurch der Auswahlprozess eben unterschiedliche Strategien favorisieren. In Abschnitt 6.3 wurde beispielsweise eine Realisierung des Prozesses dargestellt. Hierdurch wurde deutlich, dass für das vorgestellte Szenario eine konforme Eingriffsschwelle leistungsfähiger ist als eine konstante.

# Kapitel 7

## Fazit

### 7.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur ganzheitlichen Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie mit Schwerpunkt auf der Stopfung. Das wird erreicht indem auf die Funktionsblöcke von Abb. 1.2 einzeln eingegangen wird um schließlich im Kapitel 6 den gesamten prädiktiven Regelkreis zusammenzusetzen.

Nachdem in Kapitel 1 das Problem eingeführt und abgegrenzt wird, ist der Stand der Forschung Gegenstand des Kapitels 2. Zum einen werden verschiedene Modelle des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie, zum anderen Optimierungsverfahren zur Planung der Instandhaltungsaufgaben rezensiert. Daraus wird die Vielfalt der vorhandenen Ansätze deutlich: es gibt Modelle unterschiedlicher Verhalten (deterministisch und stochastisch), Komplexität (linear, polynomisch und exponentiell) und verschiedene Datenquellen zur Parametrierung (Laborversuche und Messdaten).

Darauf folgend stellt Kapitel 3 das in dieser Arbeit eingeführte Alterungs- und Instandsetzungsprozessmodell vor. Es handelt sich um ein stochastisches, exponentielles Modell, das auf Messdaten für seine Parametrierung beruht. Von den herkömmlichen Modellen weicht es im Wesentlichen dadurch ab, dass die Anzahl der seit der letzten Erneuerung durchgeführten Stopfungen als Einflussfaktor auf den Prozess betrachtet wird, wodurch die Simulation der ganzen Nutzungsdauer des Gleises unterstützt wird. Zudem wird durch Clusteranalyse die Modellierung inhomogener Gleisabschnitte ermöglicht.

Anhand des Prognostizierungsverfahrens von Kapitel 4 kann das prädiktive Charakteristikum des Instandhaltungsprozesses realisiert werden. Dafür wird ein hybrides Prozessmodell eingesetzt, anhand dessen drei Systemzustände definiert werden – je nach Anzahl von Messungen seit der letzten Stopfung und Zeit bis zur nächsten Stopfung.

Also wird entsprechend dem aktuellen Zustand der für die Prognoseerstellung geeignete Algorithmus angewendet.

In Kapitel 5 wird ein Verfahren zur optimalen Planung der Stopfeingriffe vorgestellt. Dieses basiert auf einem heuristischen Algorithmus der spezifisch für die Lösung dieses Problems entwickelt wurde, während herkömmliche Ansätze vorgefertigte Algorithmen einsetzen. Das stellt einen signifikanten Vorsprung dar indem beide die Rechenzeiten und die Präzision der bezogenen Lösungen erhebliche Verbesserungen aufweisen.

Zuletzt beschäftigt sich Kapitel 6 mit dem ganzheitlichen Prozess der Instandhaltungsplanung und -optimierung. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Simulation der ganzen Nutzungsdauer des Gleises. Dafür sind allerdings viele Eingangsdaten erforderlich. Dazu gehören die Parametrierungen der Alterungs- und Instandsetzungsmodelle aller Gleissektoren, die Schienennetztopologie, die für die Instandhaltungsmaßnahmen zur Verfügung stehenden Zeitfenster sowie all die relevanten Merkmale der einzusetzenden Instandhaltungsmaschinen. Zur methodischen Auswertung der Simulationsergebnisse wird der paarweise Vergleich angewendet.

Alle Bausteine dieser Arbeit sowie die Simulationsumgebung wurden anhand von auf realen Messdaten basierenden Fallstudien in ihren jeweiligen Kapiteln validiert. Die Messdaten stammen aus einer Datenbank mit Messreihen von über 20 Jahren der Gleisgeometrie einer französischen TGV Strecke mit über 200 Gleissektoren von jeweils einem Kilometer.

## 7.2 Würdigung der Ergebnisse

Im Rahmen weitergehender Arbeiten sollten die folgenden erwähnten Beschränkungen aufgehoben bzw. vermindert werden:

**Alterungs- und Instandsetzungsmodell (Kapitel 3).** Das Modell kann durch Berücksichtigung weiterer Instandhaltungsaufgabentypen, z. B. Schleifen, als auch weiterer Alterungsfaktoren wie z. B. Kurvenradius, Wetter, u. s. w., erweitert bzw. verbessert werden.

**Prognostizierungsverfahren (Kapitel 4).** In Anbetracht des stochastischen Charakteristikums des Alterungs- und Instandsetzungsprozesses der Gleisgeometrie wäre eine vielversprechende Möglichkeit zur Erweiterung des Prognostizierungsverfahrens die Ermittlung, zusammen mit einer Prognose, eines Konfidenzintervalls und -niveaus. Dieses würde zur Robustheit der Aufgabenplanung beitragen.

**Aufgabenplanung (Kapitel 5).** Als Einschränkung der Heuristik zählt die Annahme, dass alle Zeitfenster die gleiche Dauer aufweisen, was die Anwendbarkeit auf

bestimmte Szenarien wie z. B. französische Hochgeschwindigkeitsstrecken, beschränkt. Die Aufhebung dieser Einschränkung sollte zur Weiterentwicklung des Algorithmus gehören.

**Ganzheitliche Prozessoptimierung (Kapitel 6).** Eine nennenswerte Begrenzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, dass sie unter allen Instandhaltungsaufgaben der Gleisgeometrie lediglich auf Stopfeingriffe fokussiert. Obwohl dieser im technischen und wirtschaftlichen Sinne der bedeutendste Aufgabentyp ist, würde die Berücksichtigung anderer, wie z. B. Schleifen, eine breitere Anwendbarkeit mit sich bringen, insbesondere dem Alterungs- und Instandsetzungsmodell.

Zu den Stärken der vorliegenden Arbeit zählt ihr hoher Innovationsgrad, der sich in folgenden Aspekten offenbart:

**Alterungs- und Instandsetzungsmodell (Kapitel 3).** Berücksichtigung der Anzahl von durchgeführten Stopfeingriffen als Einflussfaktor auf die Alterungsgeschwindigkeit und auf die Wirkung der nächsten Eingriffe.

**Prognostizierungsverfahren (Kapitel 4).** Explizite Modellierung des hybriden Charakteristikums des Prozesses. Benutzung angepasster Algorithmen für die drei identifizierten Systemzustände, nämlich Initial-, Setzungs- und Normalzustand.

**Aufgabenplanung (Kapitel 5).** Entwicklung einer dedizierten Heuristik anstatt der Benutzung vorgefertigter Softwarepakete, worauf die inkrementierte Planungspräzision und die Reduktion der Berechnungszeit zurückzuführen ist.

**Ganzheitliche Prozessoptimierung (Kapitel 6).** Simulation der gesamten Nutzdauer des Gleises. Langfristige Optimierung der Instandhaltungsstrategie.

## 7.3 Ausblick

Die ganzheitliche Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie verschafft folgende Vorteile:

- Auf Messreihen basierende systematische Identifizierung der Parameter des Alterungs- und Instandsetzungsmodells.
- Die robuste Prognostizierung des Verlaufs der Gleisgeometriefehler.
- Die rechnergestützte optimierte Aufgabenplanung. Diese erfordert im Vergleich zur herkömmlichen manuellen Planung weniger Expertise und Zeit und liefert zugleich präzisere Pläne.
- Die Möglichkeit der Simulation der gesamten Nutzdauer des Gleises und die dadurch ermöglichte langfristige Optimierung des Instandhaltungsprozesses.

- Auf das Problem der Entscheidung der Instandhaltungsstrategie wird systematisch eingegangen wodurch die gewonnenen Ergebnisse hohe Transparenz erweisen.

Zusammenfassend hat die vorliegende Arbeit die Zweckmäßigkeit und den Nutzen der Optimierung des Instandhaltungsprozesses der Gleisgeometrie anhand von automatisierter Systemmodellierung, Fehlerprognose und Aufgabenplanung sowie langfristiger Strategieoptimierung, verdeutlicht.

# Literaturverzeichnis

- [ANTONI, 2010] ANTONI, M. (2010). *Degradation Laws of Railway ballasted track Estimation of the need of maintenance*. International Conference on Accelerated Life Testing.
- [ANTONI et al., 2009] ANTONI, M., C. MEIER-HIRMER und D. LÉVI (2009). *Módelisation des dépenses d’entretien du ballast, première partie*. Revue générale des chemis de fer.
- [APPLEGATE et al., 2007] APPLEGATE, D., R. BIXBY, V. CHVÁTAL und W. COOK (2007). *The Traveling Salesman Problem. A Computational Study*. Princeton University Press.
- [BARTRAM et al., 2008] BARTRAM, D., M. BURROW und X. YAO (2008). *A computational intelligence approach to railway track intervention planning*, S. 163–198. Evolutionary Computation in Practice. Springer.
- [BERINGER, 2007] BERINGER, J. (2007). *Online-Data-Mining auf Datenströmen: Methoden zur Clusteranalyse und Klassifikation*. Doktorarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [BLUM und ESKANDARIAN, 2002] BLUM, J. und A. ESKANDARIAN (2002). *Domain-specific genetic agents for flow optimization of freight railroad traffic*. In: *Computers in railways VIII*, S. 787–796. WIT Press.
- [BRADSKY und KAEHLER, 2008] BRADSKY, G. und A. KAEHLER (2008). *Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library*. O’Reilly.
- [BREIMAN et al., 1984] BREIMAN, L., J. FRIEDMAN, R. OLSHEN und C. STONE (1984). *Classification and regression trees*. Chapman & Hall.
- [BROWN, 1962] BROWN, R. G. (1962). *Forecasting and Prediction of Discrete Time Series*. Prentice-Hall.
- [BRUNI et al., 2002] BRUNI, S., C. A. und R. CORRADI (2002). *Numerical modelling of railway runnability and ballast settlement in railroad bridges*. In: *EURODYN 2002 : proceedings of the 4th [i.e. 5th] international conference on structural dynamics*, Bd. 2, S. 1143–1148.

- [BUDAI und DEKKER, 2004] BUDAI, G. und R. DEKKER (2004). *Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities*.
- [DE RUS, 2008] DE RUS, GINÉS (2008). *The Economic Effects of High Speed Rail Investment*. Technischer Bericht, Joint Transport Research Centre, University of Las Palmas.
- [DILL, 2000] DILL, C. (2000). *Paarweiser Vergleich*. [http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/npaarweiser\\_vergleich\\_b.html](http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/npaarweiser_vergleich_b.html). Stand 30 Mai 2011.
- [DIN EN 13231-1, 2011] DIN EN 13231-1 (2011). *Bahnanwendungen - Oberbau - Abnahme von Arbeiten - Teil 1: Arbeiten im Schotteroberbau - Gleise, Weichen und Kreuzungen*.
- [DIN EN 13848-5, 2010] DIN EN 13848-5 (2010). *Bahnanwendungen - Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie - Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen - Gleise*.
- [DUDLAY, 1999] DUDLAY, R.M. (1999). *Uniform Central Limit Theorems*. Cambridge University Press.
- [ESVELD, 2001] ESVELD, C. (2001). *Modern railway track*. MRT-Productions.
- [GERARD et al., 2009] GERARD, N., S. KAIN, J. NACHTWEI, C. STÖSSEL, S. WELKE, S. HUBER und E. WIESE (2009). *Guideline zur Clusteranalyse*. <http://www2.hu-berlin.de/psychologie/ingpsycscw/MethWiki/pmwiki.php?n=Guidelines.Clusteranalyse>. Stand 21 Juni 2011.
- [GRIMES, 1995] GRIMES, C.A. (1995). *Application of Genetic Techniques to the Planning of Railway Track Maintenance Work*. In: ZALZALA, A.M.S., Hrsg.: *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, GALESIA, Bd. 414, S. 467–472. Institution of Electrical Engineers.
- [HAMID und GROSS, 1981] HAMID, A. und A. GROSS (1981). *Track-quality indices and track degradation models for maintenance-of-way planning*. Transportation Research Board, 2-8(802).
- [HIGGINS et al., 1999] HIGGINS, A., L. FERREIRA und M. LAKE (1999). *Scheduling rail track maintenance to minimise overall delays*. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
- [HOLZFEIND et al., 2009] HOLZFEIND, J., R. HUMMITZSCH und B. M. ZUNK (2009). *Track analyses and maintenance planning ("2TAMP") als Basis wirtschaftlicher Instandhaltungsstrategien für den Eisenbahnoberbau*. WING-Business, 2:29–32.
- [DE HOON, 2010] HOON, M.J.J. DE (2010). *The C Clustering Library for cDNA microarray data*. <http://bonsai.hgc.jp/~mdehoon/software/cluster/software.htm>. Stand 31 Juni 2010.



- [JOVANOVIĆ, 2004] JOVANOVIĆ, S. (2004). *Railway track quality assessment and related decision making*. In: *IEEE 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- [KOZA, 1992] KOZA, J.R. (1992). *Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection*. The MIT Press.
- [KROESE et al., 2011] KROESE, D.P., T. TAIMRE und Z. BOTEV (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. Wiley series in probability and statistics. John Wiley and Sons, New York.
- [LAKE und FERREIRA, 2002] LAKE, M. und L. FERREIRA (2002). *Minimising the conflict between rail operations and infrastructure maintenance*. In: TAYLOR, M.A., Hrsg.: *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century: Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, S. 63–80. Elsevier.
- [LAKE et al., 2000] LAKE, M., L. FERREIRA und M. MURRAY (2000). *Minimising costs in scheduling railway track maintenance*. *Computers in Railways VII*, S. 895–902.
- [LAMBROPOULOS, 2002] LAMBROPOULOS, T. (2002). *Genetic algorithm application for the solution of the optimal dispatching problem*. In: *Computers in railways VIII*, S. 827–836. WIT Press.
- [LICHTBERGER, 2007] LICHTBERGER, B. (2007). *Das System Gleis und seine Instandhaltung*. *Eisenbahningenieur*, 58(1):10–19.
- [LICHTBERGER, 2010] LICHTBERGER, B. (2010). *Handbuch Gleis*. Eurail Press, 3. Aufl.
- [LOURAKIS, 2004] LOURAKIS, M.I.A. (2004). *levmar: Levenberg-Marquardt nonlinear least squares algorithms in C/C++*. <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>. Stand 31 Januar 2010.
- [LUNZE, 2002] LUNZE, J. (2002). *What is a hybrid system?*. In: ENGELL, S., G. FREHSE und E. SCHNIEDER, Hrsg.: *Modelling, analysis, and Design of Hybrid Systems*, Bd. Lecture Notes in Control and Information Sciences (LNCIS), S. 3–14. Springer.
- [LYNGBY et al., 2008] LYNGBY, N., P. HOKSTAD und J. VATN (2008). *RAMS Management of Railway Tracks*. In: *Handbook of Performability Engineering*, S. 1123–1145. Springer.
- [MARKOW, 1971] MARKOW, A. (1971). *Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain*. In: HOWARD, R., Hrsg.: *1: Markov Chains*, Dynamic Probabilistic Systems, Kap. Appendix B. John Wiley and Sons.

- [MARQUARDT, 1963] MARQUARDT, D. (1963). *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*. SIAM J. Appl. Math., 11.
- [MEIER-HIRMER, 2007] MEIER-HIRMER, C. (2007). *Modèles et techniques probabilistes pour l'optimisation des stratégies de maintenance. Application au domaine ferroviaire..* Doktorarbeit, Université de Marne-la-Vallée.
- [MEIER-HIRMER et al., 2006] MEIER-HIRMER, C. et al. (2006). *A decision support system for track maintenance*. Computers in railways X, S. 217–226.
- [MICHALEWICZ und FOGEL, 2002] MICHALEWICZ, Z. und D. FOGEL (2002). *How to Solve It: Modern Heuristics*. Springer.
- [MIWA et al., 2000] MIWA, M., T. ISHIKAWA und T. OYAMA (2000). *Modeling the Transition Process of Railway Track Irregularity and Its Application to the Optimal Decision-making for Multiple Tie Tamper Operations*. In: *3rd International Conference Proceedings "Railway Engineering 2000"*.
- [MONTGOMERY et al., 1990] MONTGOMERY, D.C., L. JOHNSON und J. GARDINER (1990). *Forecasting and Time Series Analysis*. McGraw-Hill.
- [OH et al., 2006] OH, S.M., J. LEE, B. PARK, H. LEE und S. HONG (2006). *A study on a mathematical model of the track maintenance scheduling problem*. Computers in Railways X, S. 85–97.
- [OYAMA und MIWA, 2006] OYAMA, T. und M. MIWA (2006). *Mathematical modeling analysis for obtaining an optimal railway track maintenance schedule*. Japan journal of industrial and applied mathematics: JJIAM, 23(2):207–224.
- [QUIROGA und SCHNIEDER, 2010a] QUIROGA, L. und E. SCHNIEDER (2010a). *Modelling high speed railroad geometry ageing as a discrete-continuous process..* In: *Proceedings of the Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis International Conference, SMTDA 2010*.
- [QUIROGA und SCHNIEDER, 2010b] QUIROGA, L. und E. SCHNIEDER (2010b). *Monte Carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration*. In: *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2010*.
- [QUIROGA et al., 2008] QUIROGA, L., R. SLOVAK, S. WEGELE und M. ANTONI (2008). *Petri net based simulation and optimisation of railway maintenance processes*. In: TARNAI, G. und E. SCHNIEDER, Hrsg.: *Formal Methods for Railway Operation and Safety in Railway and Automotive Systems, Symposium (FORMS) 2008*, S. 173–183. L'Harmattan.
- [SACHS und HEDDERICH, 2006] SACHS, L. und J. HEDDERICH (2006). *Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R*. Springer, 12. Aufl.

- [SADEGHI und ASKARINEJAD, 2010] SADEGHI, J. und H. ASKARINEJAD (2010). *Development of improved railway track degradation models*. Structure and Infrastructure Engineering, 6(6):675–688.
- [SATO, 1999] SATO, K. (1999). *Lévy Processes and Infinitely Divisible Distributions*. Cambridge University Press.
- [SAUSSINE, 2004] SAUSSINE, G. (2004). *Contribution a la modelisation de granulats tridimensionnels: application au ballast*. Doktorarbeit, Université Montpellier II.
- [SCHNIEDER, 2009] SCHNIEDER, L. (2009). *Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit*. Doktorarbeit, TU Braunschweig.
- [SCHULZE, 2007] SCHULZE, P. (2007). *Beschreibende Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 6. Aufl.
- [SENÉE, 2005] SENÉE, A. (2005). *Analyse des indicateurs des défauts de géométrie de la voie ferroviaire*. Diplomarbeit, École Nationale de Statistique et de l'Analyse de l'Information.
- [STUART et al., 1999] STUART, ALAN, K. ORD und S. ARNOLD (1999). *Classical Inference and the Linear Model*. Kendall's Advanced Theory of Statistics, Bd. 2A. Hodder Arnold.
- [UBALDE et al., 2005] UBALDE, L., A. LÓPEZ PITA, P. TEIXEIRA, A. BACHILLER und I. GALLEGÓ (2005). *Track deterioration in high-speed railways: influence of stochastic parameters*. In: *Proceedings of the Railway Engineering 2005, 8th International conference and exhibition*.
- [UIC, 2010] UIC (2010). *High speed world network evolution*. <http://uic.asso.fr/spip.php?article573>. Stand 29 Juli 2010.
- [VALE et al., 2011] VALE, C., I. RIBEIRO und R. CALÇADA (2011). *Scheduling tampering through global optimization of maintenance costs*. In: *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research, WCRR 2011*.
- [VEIT, 2007a] VEIT, P. (2007a). *Instandhaltung und Anlagenmanagement*, Bd. Handbuch Eisenbahninfrastruktur, S. 872–925. Springer.
- [VEIT, 2007b] VEIT, P. (2007b). *Track Quality - Luxury or Necessity?*. Railway Technical Review Special: Maintenance & Renewal.
- [WEGELE, 2005] WEGELE, S. (2005). *Echtzeioptimierung für die Disposition im Schienenverkehr*. Doktorarbeit, TU Braunschweig.
- [WIKIPEDIA, 2011a] WIKIPEDIA (2011a). *Cluster*. Wikipedia. Die freie Enzyklopädie. Stand 21 Juni 2011.

- [WIKIPEDIA, 2011b] WIKIPEDIA (2011b). *Quantil*. Wikipedia. Die freie Enzyklopädie. Stand 21 Juni 2011.